

Vicente Mafra

**MODELAGEM DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO
EM ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do título de Engenheiro
Civil.

Orientadora: Prof. Dr. Gracieli
Dienstmann

Florianópolis
2018

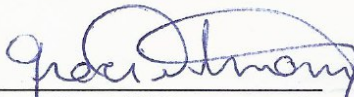
Vicente Mafrá

MODELAGEM DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM ELEMENTOS FINITOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 2018

Prof. Luciana Rohde, Dr.
Coordenadora do curso



Prof. Gracieli Dienstmann, Dr.
Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Banca examinadora:

Prof. Marciano Maccarini, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Cesar Schmidt Godoi, Msc.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Vitor Pereira Faro, Dr.
Universidade Federal Paraná

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Mafra, Vicente
Modelagem do ensaio de cisalhamento direto em
elementos finitos / Vicente Mafra ; orientador,
Gracieli Dienstmann, 2018.
89 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Cisalhamento Direto. 3.
Elementos finitos. I. Dienstmann, Gracieli. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por todo o incentivo e apoio durante a graduação e por todos os momentos anteriores, trabalhando a todo momento o caráter e o amor.

À Jéssica por ter acompanhado o processo, ajudando e dando forças em todos os sentidos.

À minha orientadora Gracieli Dienstmann pela apresentação do tema do trabalho, pelos ensinamentos passados, por todo o apoio e paciência durante esse trabalho e como professora de mecânica dos solos.

Ao professor Rafael Higashi por ter me acolhido no laboratório quando fui em busca de estágio e por ter me acompanhado na iniciação científica, fase de muito aprendizado em minha formação acadêmica.

Aos meus professores por todo conhecimento passado e por manterem o empenho, o compromisso e a perseverança nessa fantástica profissão.

Aos colegas de apartamento Dário Menegasso Pires e Pedro Schulze pelo companheirismo e ensinamentos (geralmente não-propositais) sobre convivência.

À minha família por estar sempre próxima e estimulando o meu crescimento.

Aos colegas de graduação e demais colegas de laboratório pelo companheirismo honesto, voltado para uma convivência benéfica a todos.

A todos os meus amigos pelo companheirismo e momentos de lazer em conjunto.

RESUMO

O ensaio de cisalhamento direto foi desenvolvido para obter de forma simples a envoltória de ruptura do solo. É provavelmente o mais antigo e mais simples ensaio nesse sentido. Apesar da simplicidade conceitual e de execução, durante a fase de cisalhamento o ensaio apresenta uma complexa distribuição de tensões no interior da amostra. A superfície de ruptura acontece de forma progressiva, por pontos de plastificação consecutivos. Com o intuito de auxiliar a interpretação do ensaio de cisalhamento direto, o presente trabalho visa estudar as tensões e deformações na amostra durante a execução do ensaio, por meio do método dos elementos finitos. A geometria desenvolvida foi baseada no equipamento de cisalhamento direto do laboratório de mecânica dos solos da Universidade Federal de Santa Catarina e foi implementada no *software ABAQUS*, em sua versão estudantil. O modelo geométrico adotado é bidimensional e representa uma seção na direção do esforço cisalhante. Duas geometrias bi-dimensionais básicas foram avaliadas: uma contendo as placas de cravação no topo e base da amostra; outra sem placas, visando representar a não cravação e ou inexistência da placa. O cisalhamento foi aplicado ao modelo pela imposição de deslocamentos a velocidade constante a partes do modelo. Quanto ao comportamento do material da amostra modelada, foram feitas análises paramétricas pelos modelos elastoplásticos com envoltória de Mohr-Coulomb e pelo modelo *Cam-clay*. A avaliação dos modelos geométricos bidimensionais foi feita a partir da comparação dos resultados numéricos com os resultados de ensaios de cisalhamento direto anteriormente realizados. Após validados os modelos, foram feitas análises paramétricas com o intuito de identificar a variação dos mecanismos de ruptura de acordo com os dados de entrada dos modelos, de maneira a interpretar a influência da evolução das tensões durante a fase de cisalhamento do ensaio. Os modelos geométricos adotados demonstraram capacidade de descrever as curvas de tensão e deformação típicas dos ensaios de laboratório. Dessa forma pôde-se verificar a influência de diversos parâmetros de entrada, em especial do correto uso da placa dentada.

Lista de figuras

Figura 1: Representação do critério de ruptura de Mohr.....	16
Figura 2: Componentes básicos do equipamento de ensaio triaxial.....	17
Figura 3: Componentes básicos do equipamento do ensaio de compressão confinada.....	18
Figura 4: Placa dentada.....	19
Figura 5: Componentes básicos do equipamento de cisalhamento direto.	21
Figura 6: Gráfico de tensão de cisalhamento.....	23
Figura 7: Envoltórias de ruptura características, obtidas por ensaios de cisalhamento direto.....	24
Figura 8: Fluxo de trabalho.....	28
Figura 9: Geometrias dos modelos.....	29
Figura 10: Malhas dos modelos.....	30
Figura 11: Modelo esquemático, fase de cisalhamento.....	32
Figura 12: Obtenção do modulo de elasticidade E_{50}	33
Figura 13: Diferença entre as envoltórias nos domínios τ - σ e P - q	34
Figura 14: Curva típica do ensaio de adensamento.....	39
Figura 15: Avaliação inicial do modelo com envoltória de Mohr Coulomb (Amostra 01).....	43
Figura 16: Avaliação inicial do modelo com envoltória de Mohr Coulomb (Amostra 02).....	43
Figura 17: Avaliação inicial do modelo com envoltória de Mohr Coulomb (Amostra 03).....	44
Figura 18: Avaliação inicial do modelo com envoltória de Mohr Coulomb (Amostra 04).....	44
Figura 19: Avaliação inicial do modelo com envoltória de Mohr Coulomb (Amostra 05).....	45
Figura 20: Tensão cisalhante desenvolvida quando $N < a$	46
Figura 21: Amostra 01, avaliação inicial do modelo - <i>clay-plasticity</i>	47
Figura 22: Amostra 02, avaliação inicial do modelo - <i>clay-plasticity</i>	47
Figura 23: Amostra 03, avaliação inicial do modelo - <i>clay-plasticity</i>	48
Figura 24: Amostra 04, avaliação inicial do modelo - <i>clay-plasticity</i>	48

Figura 25: Amostra 05, avaliação inicial do modelo – <i>clay-plasticity</i> ..	49
Figura 26: Análise paramétrica de acordo com a coesão (placa dentada)	51
Figura 27: Análise paramétrica de acordo com o módulo de elasticidade (placa dentada).....	52
Figura 28: Análise paramétrica de acordo com o ângulo de atrito (placa dentada).....	53
Figura 29: Análise paramétrica em relação a N (placa dentada).....	54
Figura 30: Retroanálise com o modelo de placa dentada (Mohr-Coulomb).....	55
Figura 31: Perfil de deformação plástica (PE) do corpo de prova.....	56
Figura 32: Retroanálise do modelo por Mohr-Coulomb por σ_{12} e σ_{22} .	57
Figura 33: Caminhos de tensão por σ_{12} e σ_{22} (Mohr-Coulomb).....	58
Figura 34: Análise paramétrica de acordo com a coesão (lisa).....	59
Figura 35: Análise paramétrica de acordo com ao módulo de elasticidade (lisa).....	60
Figura 36: Análise paramétrica de acordo com ao ângulo de atrito (lisa)	61
Figura 37: Análise paramétrica de acordo com ao esforço normal (lisa)	62
Figura 38: Retroanálise com o modelo de placa lisa (Mohr-Coulomb).	63
Figura 39: Perfil de deformação plástica típica do corpo de prova sem o uso dos dentes.....	64
Figura 40: Análise paramétrica em relação ao índice de compressão (λ)	66
Figura 41: Análise paramétrica em relação à tensão de pré adensamento (duas vezes a).....	67
Figura 42: Análise paramétrica em relação à tensão normal aplicada ao modelo (N).....	69
Figura 43: Caminhos de tensão por σ_{12} e σ_{22} (<i>Clay-Plasticity</i>).....	69
Figura 44: Análise paramétrica em relação ou índice de compressão com placa lisa.....	70
Figura 45: Análise paramétrica em relação ao parâmetro a (metade da pressão de pré adensamento).....	71

Figura 46: Análise paramétrica em relação à pressão normal aplicada ao corpo de prova (<i>N</i>).....	72
Figura 47: Estados típicos de movimentação.....	73
Figura 48: Estados típicos de tensão cisalhante.....	74
Figura 49: Reações dos apoios com placa dentada (<i>clay-plasticity</i>).....	75
Figura 50: Reações dos apoios com placa lisa (<i>clay-plasticity</i>).....	75
Figura 51: Reações dos apoios com placa dentada (Mohr-Coulomb)....	76
Figura 52: Reações dos apoios com placa lisa (Mohr-Coulomb).....	76
Figura 53: Ensaio simulados (modelo com envoltória de Mohr-Coulomb).....	77
Figura 54: Ensaio simulados (<i>clay-plasticity</i>).....	77
Figura 55: Superfícies de ruptura, ensaio de Cisalhamento Direto.....	79

Lista de Símbolos

a	Tamanho da superfície elíptica (<i>Cam-clay</i>)
c	Intercepto coesivo
c'	Coesão efetiva
C_c	Coeficiente de compressão
C_r	Coeficiente de recompressão
c_u	Resistência ao cisalhamento não drenado
E	Módulo de elasticidade
e	Índice de vazios
e_0	Índice de vazios inicial
M	Inclinação da linha do estado crítico (<i>Cam-clay</i>)
p'_{c0}	Tensão de pré adensamento
PE	Deformação plástica (ABAQUS [®])
P	Deformação (ABAQUS [®])
$S11$	Tensão na horizontal (x) (ABAQUS [®])
$S12$	Tensão na cisalhante (ABAQUS [®])
$S22$	Tensão na vertical (y) (ABAQUS [®])
$U1$	Deslocamento horizontal (ABAQUS [®])
δ	Ângulo de atrito equivalente
$\Delta\sigma$	Tensão desvio
κ	Índice elástico
λ	Índice plástico
ν	Coeficiente de Poisson
σ	Tensão axial
σ'	Tensão efetiva
σ_1	Tensão principal máxima
σ_{11}	Tensão na horizontal (x)

σ_{12}	Tensão cisalhante
σ_{22}	Tensão na vertical (y)
σ_3	Tensão principal mínima ou tensão confinante
τ	Tensão cisalhante
τ_f	Máxima resistência ao cisalhamento
ϕ	Ângulo de atrito
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivo geral.....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Organização do trabalho.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 Resistência ao cisalhamento do solo.....	15
2.2 Ensaio de compressão simples.....	16
2.3 Ensaio triaxial.....	17
2.4 Ensaio de compressão confinada.....	18
2.5 Ensaio de cisalhamento direto.....	19
2.5.1 Resultados e interpretação do ensaio.....	22
2.6 Método de Elementos Finitos.....	24
2.7 Tensões internas no ensaio de cisalhamento direto.....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Modelagem numérica.....	28
3.2 Modelagem pelo modelo elastoplástico com critério de ruptura	
Mohr-Coulomb.....	32
3.2.1 Obtenção de parâmetros do solo.....	32
3.3 Modelagem pelo modelo elastoplástico <i>clay-Plasticity</i>	37
3.3.1 Obtenção de parâmetros do solo.....	37
4 RESULTADOS.....	41
4.1 Avaliação dos modelos.....	41
4.1.1 Avaliação do modelo com envoltória de ruptura de Mohr-	
Coulomb.....	41
4.1.2 Avaliação do modelo com <i>Clay-plasticity</i> (ABAQUS®).....	45
4.2 Análise Paramétrica.....	49
4.2.1 Análise paramétrica das simulações utilizando o modelo	
elastoplástico com envoltória de Mohr-Coulomb.....	49
4.2.1.1 Modelo com placa dentada.....	50
4.2.1.2 Modelo com placas lisas.....	58
4.2.2 Análise paramétrica das simulações utilizando o modelo	
elastoplástico <i>Cam-clay</i>	64
4.2.2.1 Modelo com placa dentada.....	65
4.2.2.2 Modelo com placa lisa.....	70
4.3 Análises complementares em relação ao uso da placa dentada.....	72

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....80

5.1 Conclusões.....80

5.2 Sugestões de trabalhos futuros.....82

6 BIBLIOGRAFIA.....83

Anexos.....85

1 INTRODUÇÃO

O Ensaio de cisalhamento direto foi desenvolvido para descrever envoltórias de resistência do solo, sendo o mais antigo e mais simples ensaio nesse sentido (HEAD; EPPE, 2011). Apesar da simplicidade quanto à execução e interpretação do ensaio de cisalhamento direto, Pinto (2006) afirma que durante o ensaio, a distribuição de tensões no corpo de prova é complexa e não uniforme. Ainda, segundo Drescher (1995) e Potts et al. (1987) a falha acontece de forma progressiva, por pontos de plastificação consecutivos.

Silva (2001) observou que em estágios do ensaio realizados a pequenas tensões normais pode não ocorrer a cravação da placa dentada ao corpo de prova, nesses casos, ao proceder o cisalhamento, a superfície de ruptura pode deslocar-se do plano esperado.

Para realizar a análise da natureza de processos é necessária a criação de modelos, que não visam representar perfeitamente a realidade, mas visam conter os aspectos essenciais à compreensão (WOOD, 1990). Nesse sentido, por meio de um modelo bidimensional em elementos finitos, o presente trabalho propõe-se a avaliar as tensões e deformações presentes no corpo de prova durante o ensaio de cisalhamento direto, avaliando assim possíveis problemas de interpretação gerados pelo não uso ou não cravação da placa dentada.

1.1 Objetivo geral

Identificar, por meio do método dos elementos finitos, a influência da não utilização ou da não cravação da placa dentada ao corpo de prova durante a fase de cisalhamento do ensaio de Cisalhamento Direto.

1.2 Objetivos específicos

- Obter, pelo método dos elementos finitos, modelo bidimensional que represente o comportamento típico do ensaio de cisalhamento direto durante a fase de cisalhamento.
- Realizar análise paramétrica de modo a melhor compreender como cada parâmetro influencia nos resultados do ensaio e no

comportamento da amostra durante a fase de cisalhamento do ensaio de cisalhamento direto.

- Fazer considerações quanto à utilização dos resultados obtidos por meio do ensaio de cisalhamento direto a diferentes condições da amostra.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho foi organizado em cinco capítulos, com objetivos diferentes:

- O capítulo atual visa apresentar o trabalho ao leitor.
- O segundo capítulo, o embasamento teórico, tem por objetivo apresentar as bases teóricas utilizadas no trabalho, além de apresentar alguns trabalhos correlatos aos assuntos abordados.
- No terceiro capítulo (materiais e métodos) são apresentados os procedimentos e as ferramentas utilizados à execução do trabalho, garantindo a possibilidade de reprodução dos experimentos.
- O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos acompanhados de uma breve discussão.
- No quinto capítulo é feita uma apresentação, de forma sintética, das conclusões que podem ser obtidas a partir dos resultados do trabalho em conjunto com a base teórica.
- No último capítulo são referenciados os trabalhos citados ao longo do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo serão abordados temas presentes na literatura, necessários ao embasamento teórico desse trabalho. Os temas abordados inicialmente são relacionados ao comportamento do solo, posteriormente são apresentados ensaios laboratoriais, incluindo o Cisalhamento Direto (foco do trabalho) e em seguida são abordados temas relacionados à modelagem.

2.1 Resistência ao cisalhamento do solo

Existem várias teorias de ruptura na mecânica dos sólidos. Quando se refere à mecânica dos solos, as teorias de ruptura que melhor retratam a realidade são aquelas baseadas nas tensões principais atuantes no solo (WU, 1967). Além disso Pinto (2006) sugere que a ruptura do solo ocorre normalmente por um fenômeno de cisalhamento.

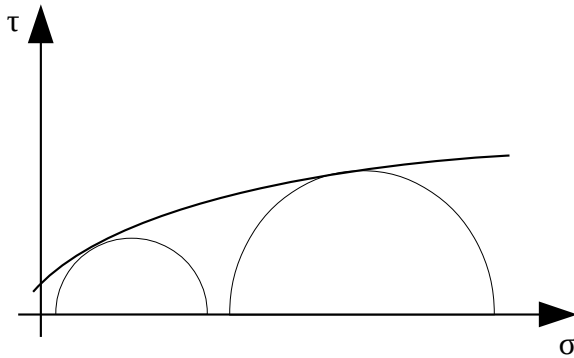
É comum a separação da resistência ao cisalhamento em duas componentes que caracterizam a envoltória de cisalhamento: a coesão (c') e o ângulo de atrito (ϕ) (TSCHEBOTARIOFF, 1951). Nesse sentido, o critério de ruptura de Coulomb é representado pela Equação 1, sendo N a tensão normal ao plano de ruptura.

$$\tau_f = c' + N \cdot \tan \phi \quad (1)$$

Esse critério assume que a resistência do solo depende de duas parcelas, uma é a coesão, força de ligação entre as partículas independente da tensão de confinamento, enquanto a outra depende do ângulo de atrito do solo e aumenta conforme a pressão de confinamento.

Outro critério semelhante que representa bem o comportamento do solo é o critério de Mohr, que segundo Pinto (2006) infere que a ruptura só aconteceria caso o estado de tensão do solo ultrapassasse a envoltória relacionada aos estados de tensão de ruptura, observados experimentalmente para o solo (Figura 1).

Figura 1: Representação do critério de ruptura de Mohr.



O critério de ruptura chamado Mohr-Coulomb é o critério de Mohr delimitado por uma envoltória retilínea, assemelhando-se dessa forma ao critério de Coulomb (PINTO, 2006).

2.2 Ensaio de compressão simples

O ensaio de compressão simples (ou ensaio não confinado) é normalmente usado para corpos de prova com características coesivas uma vez que a amostra não possui tensão confinante. Durante a execução do ensaio o corpo de prova recebe uma carga axial (σ_1) rápida e a tensão confinante (σ_3) é mantida nula (DAS, 2014).

É mais conveniente representar a resistência obtida no ensaio como uma medida de resistência a compressão simples pois como não são garantidas as condições de drenagem durante o ensaio e podem ocorrer variações no comportamento, no entanto, segundo Das (2014) se o corpo de prova manter-se em estado não drenado durante esse processo a Equação 2 é válida.

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2}, \quad (2)$$

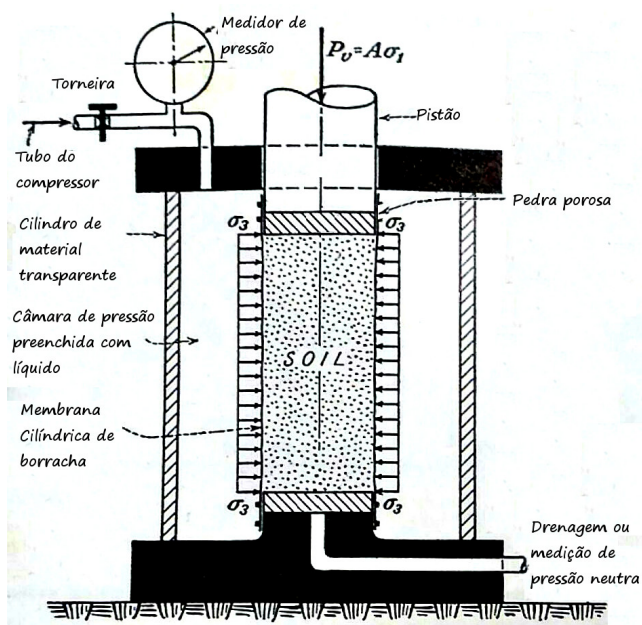
Sendo q_u a resistência a compressão não confinada do solo e τ_f a tensão última de cisalhamento.

2.3 Ensaio triaxial

O ensaio de compressão triaxial (Figura 2), ou simplesmente ensaio triaxial, visa impor tensões efetivas no solo em diferentes direções, além de controlar a drenagem e a poropressão. Classicamente, durante o ensaio, se mantém constante a pressão lateral (σ_3) enquanto a pressão axial (σ_1) é gradualmente acrescida até a ruptura (TSCHEBOTARIOFF, 1951). Uma possível variação do ensaio, descrita por Pinto (2006) é o ensaio de deformação controlada, onde o corpo de prova tem deformação constante com a variação do tempo.

A grande vantagem desse ensaio em relação ao ensaio de cisalhamento direto (descrito no sub-ítem 2.5) é o estado de tensão controlado. As tensões principais estão nos planos vertical e horizontal, nas direções em que as cargas são aplicadas.

Figura 2: Componentes básicos do equipamento de ensaio triaxial.



Fonte: Modificado de Tschebotarioff (1951).

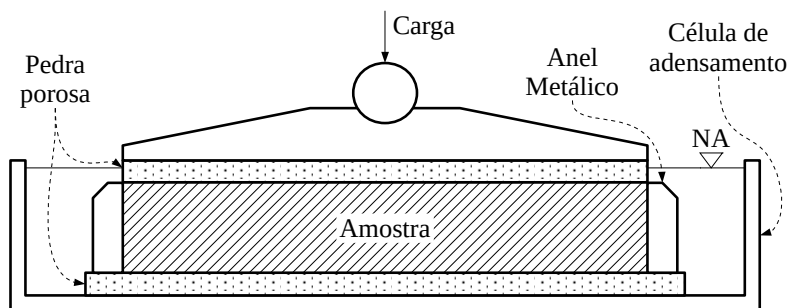
Segundo Pinto (2006) existem variações do ensaio de compressão triaxial quanto à consolidação do corpo de prova e a drenagem, sendo os

mais comuns o ensaio consolidado com cisalhamento drenado (CD), o ensaio consolidado e com cisalhamento não drenado (CU) e o ensaio não consolidado com cisalhamento não drenado (UU), conhecido como *quick* pela sua velocidade de execução.

2.4 Ensaio de compressão confinada

O ensaio de compressão confinada, ou ensaio de adensamento unidimensional (Figura 3) consiste em acompanhar a deformação gerada por uma carga vertical aplicada a um corpo de prova submerso e lateralmente confinado (DAS, 2014).

Figura 3: Componentes básicos do equipamento do ensaio de compressão confinada.



Esse ensaio visa obter informações quanto a compressibilidade do solo, expressando-a por meio dos coeficientes c_c (coeficiente de compressão) e c_r (coeficiente de recompressão), além disso, esse ensaio é capaz de adquirir dados quanto às condições de drenagem do solo (permeabilidade), por meio de correlações quanto a velocidade da mudança de volume do solo (HEAD e EPPS 2011).

Segundo Massad, (2016), esse ensaio é feito em vários estágios, de incremento de carga. Para cada estágio devem ser anotados os pontos de variação de altura da amostra (recalque) para obtenção do coeficiente de consolidação vertical (c_v). O tempo entre estágios é de 24 h. Após o último incremento de carga o descarregamento pode ser feito em apenas quatro ou cinco decrementos de tensão e o tempo entre estágios também pode ser menor.

2.5 Ensaio de cisalhamento direto

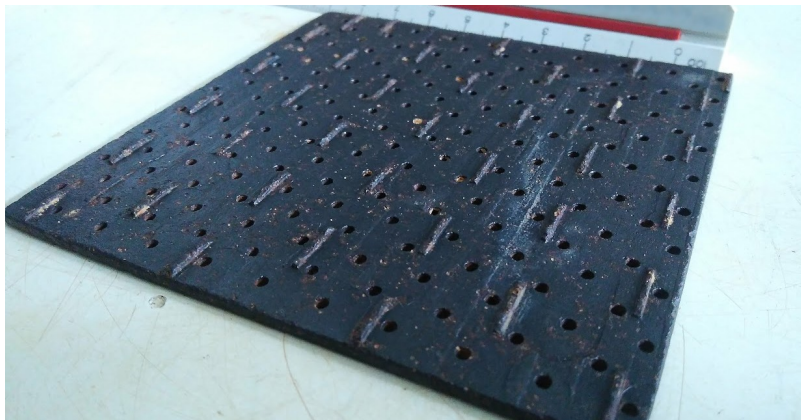
Desenvolvido para descrever, em termos de tensões totais, os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, o ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo e mais simples ensaio nesse sentido (HEAD e EPPE, 2011). O ensaio de cisalhamento direto é de fácil interpretação e rápida execução, características que fazem dele uma opção muito usada na prática.

Todas as versões desse ensaio visam deslocar uma porção de solo em relação a outra. O cisalhamento direto é usado para determinar a envoltória de ruptura do critério de Coulomb, porém ele não é apropriado para obter as características de tensão e deformação do solo (OLSON e LAI, 2004).

Esse ensaio, tradicionalmente não apresenta controle da drenagem do corpo de prova, e apesar da falta de certeza sobre a drenagem, segundo Head e Eppe (2011) é comum interpretar que as tensões obtidas por esse ensaio sejam tensões drenadas, ou seja, as tensões totais são iguais às tensões efetivas (ensaio drenado).

Outra limitação do ensaio, apontada por Silva (2001), é que o plano de ruptura pode não se formar na horizontal caso as pressões axiais sejam baixas ou a placa dentada (Figura 4) não crave corretamente.

Figura 4: Placa dentada.

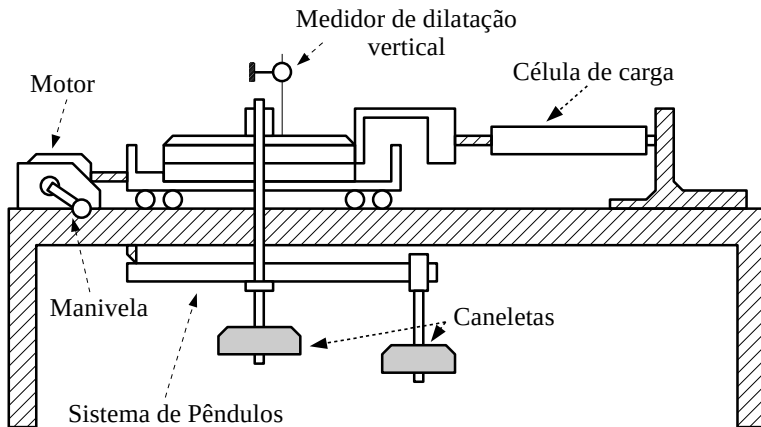


O equipamento necessário (Figura 5) ao ensaio é composto de alguns componentes essenciais: caixa de cisalhamento; placas dentadas perfuradas; pedras porosas; sistema de pesos; célula de carga; entre outros.

A caixa de cisalhamento é rígida e mantém o corpo de prova confinado lateralmente em seu interior. As placas dentadas são posicionadas nas faces maiores do corpo de prova, seus dentes cravam na face do corpo de prova impedindo o deslocamento relativo, além disso os furos permitem que aconteça a drenagem. As pedras porosas são posicionadas após as placas dentadas, elas tem a função de permitir o livre escoamento da água. O sistema de pesos é o responsável pela tensão axial imposta à amostra. A célula de carga mede a força de cisalhamento. A Figura 5 apresenta, esquematicamente, o equipamento de cisalhamento direto e seus componentes básicos.

Quanto à análise das tensões internas, apesar da aparente simplicidade, Thornton e Zhang (2003) afirmam que o exato estado de tensões no plano de ruptura é desconhecido. Além disso, Pinto (2006) afirma que o ensaio de cisalhamento direto apresenta uma complexa distribuição durante a fase de cisalhamento. O plano de cisalhamento que a amostra apresenta após o ensaio, determinado pela bipartição da caixa, pode ter sido precedido de pequenas rupturas em outras direções. Essas rupturas podem ser causadas pela rotação dos planos principais de tensão devido à força de cisalhamento aplicada.

Figura 5: Componentes básicos do equipamento de cisalhamento direto.



O ensaio acontece em dois estágios principais, as fases de consolidação e cisalhamento. A fase de consolidação consiste em alocar devidamente o corpo de prova na caixa de cisalhamento, com todas as partes montadas e na sequência aplicar uma tensão de consolidação à maior face do corpo de prova (axial à superfície de cisalhamento). As deformações verticais devem ser medidas e o término da fase de consolidação é determinado quando as deformações se estabilizam.

Na fase de cisalhamento é aplicada força na direção do cisalhamento a uma das metades da caixa de cisalhamento. Para prevenir que a fricção da caixa superior com a caixa inferior interfira no resultado do ensaio, as caixas devem ser levemente separadas com o auxílio de parafusos. O ensaio pode ser realizado aplicando-se uma força cisalhante constante, porém o mais usual é manter o deslocamento constante. Durante esse estágio são medidas as deformações, horizontais e verticais, além da tensão cisalhante.

Para que o cisalhamento aconteça em um regime drenado é necessário que a velocidade seja controlada. A velocidade adequada, segundo Head e Epps (2011), está relacionada às características de drenagem e de tamanho da amostra. A drenagem, por sua vez, tem relação com o coeficiente de consolidação cujos dados podem ser obtidos na fase de consolidação do ensaio.

Segundo Head e Epps (2011) o tempo necessário para a ruptura (t_r) é relacionado ao valor do tempo necessário ao adensamento t_{100} , que

pode ser obtido graficamente da curva de consolidação na forma $\sqrt{t_{100}}$. O tempo t_f foi relacionado ao valor $\sqrt{t_{100}}$ de forma empírica (Equação 3).

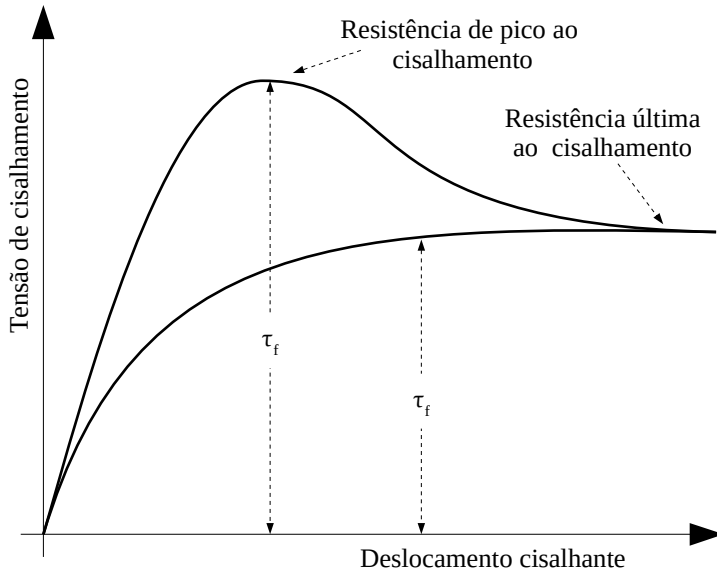
$$t_f = 12,7 \cdot \sqrt{t_{100}}^2 \text{ (min)} \quad (3)$$

(GIBSON E HENKEL, 1954 apud HEAD E EPPS, 2011, p. 231).

2.5.1 Resultados e interpretação do ensaio

Segundo Head e Epps (2011), em um gráfico devem ser alocados nas ordenadas os valores de tensão cisalhante e nas abcissas os valores de deslocamento cisalhante (Figura 6). De acordo com as características do solo pode ocorrer um pico na resistência, que se dissipa com a continuação da movimentação da caixa, mantendo a resistência última. A resistência máxima ao cisalhamento deve ser tomado como a tensão de falha no ensaio de cisalhamento direto. Deve-se além disso traçar um gráfico semelhante expressando o deslocamento vertical observado na amostra em função do deslocamento das caixas.

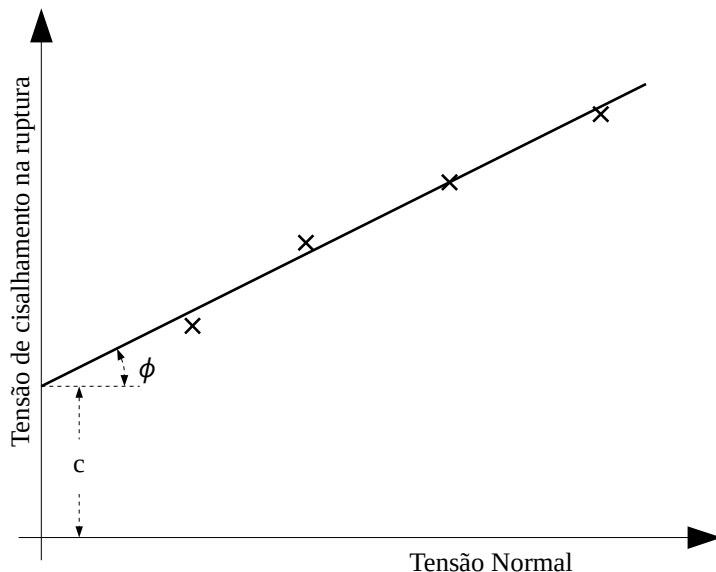
Figura 6: Gráfico de tensão de cisalhamento.



Fonte: Modificado de Das (2014).

Para um mesmo solo (amostras semelhantes) são medidas as resistências de cisalhamento de pico para ao menos três estágios, ou seja, três diferentes tensões normais aplicadas em corpos de prova semelhantes. Esses valores então são inseridos em um gráfico (Figura 7) que representa a resistência de cisalhamento em função da tensão normal (DAS, 2014). Destes pontos é traçada a linha de tendência, a inclinação dessa reta é definida como a tangente do ângulo de atrito ($\tan \phi$) e o valor no qual essa linha intercepta o eixo das ordenadas é definido como o intercepto coesivo (c').

Figura 7: Envoltórias de ruptura características, obtidas por ensaios de cisalhamento direto.



Fonte: Modificado de Das (2014).

2.6 Método de Elementos Finitos

Segundo Moayed et al. (2012) para uma modelagem geomecânica são necessárias idealizações quanto à geometria do modelo, solicitações e restrições, propriedade dos materiais, além da seleção do modelo numérico. Para a seleção do modelo podem ser adotadas soluções clássicas de equilíbrio limite, modelos baseados em diferenças finitas ou ainda o método dos elementos finitos.

O método dos elementos finitos (MEF) teve seu desenvolvimento com a chegada dos computadores digitais. Inicialmente voltado à análise de estruturas, logo o MEF foi aplicado em outros campos da engenharia como fluídos, transferência de calor, construção de aterros, entre outros (TEIXEIRA, 2006).

O MEF é capaz de discretizar o meio contínuo, de difícil solução, em elementos menores, de comportamento conhecido, gerando assim aproximações. Segundo Faro (2014), para a solução de um problema devem ser satisfeitos o equilíbrio de forças, a compatibilidade de

deslocamentos e a relação tensão x deformação do material, tanto a nível local (para cada elemento), quanto a nível global (para o conjunto de elementos).

Carter et al. (2000) afirma que o método dos elementos finitos é o mais usado e, provavelmente, o mais versátil método para resolução de problemas em geotecnia.

2.7 Tensões internas no ensaio de cisalhamento direto

A análise de tensões internas de ensaios de cisalhamento direto foi objeto de estudo de diversos autores ao longo do tempo (e.g. BAGHERZADEH-KHALKHALI; MIRGHASEMI, 2009; DOUNIAS e POTTS, 1993; MOAYED et al., 2012 E SALAZAR et al., 2015), utilizando métodos de elementos finitos ou outros métodos numéricos.

Dounias e Potts (1993) modelou o ensaio de cisalhamento direto para uma análise bidimensional de tensão e deformação por elementos finitos. Analisando as zonas de tensões encontradas, esse autor percebeu que em fases iniciais do cisalhamento as zonas tendem para fora do plano horizontal. Porém, no decorrer do ensaio, com o aumento da força cisalhante, as zonas mais solicitadas tendem a se aproximar da linha horizontal, variando de acordo com a propriedade dos materiais. Além disso, as zonas de tensão no ensaio de cisalhamento direto não são uniformes e dependem das características do material e das condições de contorno (DRESCHER, 1995).

Moayed et al. (2012) realizou modelagem semelhante, porém tridimensional. Esses autores obtiveram modelos numéricos com bons resultados em relação aos resultados experimentais para argilas arenosas. Seus trabalhos tiveram por objetivo estudar o efeito dos parâmetros de argilas arenosas em seu comportamento de resistência ao cisalhamento.

Salazar et al. (2015) modelou o ensaio de cisalhamento direto para areias usando um modelo tridimensional de resistência por rolamento pelo método dos elementos discretos (DEM). Esses autores encontraram dificuldades na obtenção de um modelo adequado, porém obtiveram resultados satisfatórios principalmente quanto à resistência. Além disso, em seus resultados foram observados elementos que se deslocaram fora do plano de uma possível análise bidimensional, o que demonstra que, para esse método, a análise bidimensional deve ser feita com cautela. Dounias e Potts (1993), em contrapartida, acredita que a

análise plana de tensões e deformações para o ensaio de cisalhamento direto é suficiente, e possíveis efeitos tridimensionais não alterariam significativamente os resultados. Analisando os resultados os autores concluíram que durante o cisalhamento, a tensão cisalhante no centro da amostra (próximo a superfície de ruptura) é maior que nas bordas.

Cui e O'Sullivan (2006) modelaram, de forma bidimensional, o ensaio de cisalhamento direto pelo método dos elementos discretos. Eles chegaram a boas correlações entre a macroescala do modelo numérico e resultados dos ensaios, em consequência consideraram que as interações de microescala seriam representativas. Além disso, os autores detectaram uma grande concentração de rotação de partículas da simulação nas proximidades das extremidades da amostra, o que indicaria a forte influência da fronteira no ensaio de cisalhamento direto.

Bagherzadeh-Khalkhali e Mirghasemi (2009) investigaram experimentalmente e numericamente a influência do tamanho máximo dos grãos no resultado de ângulo de atrito interno no ensaio de cisalhamento direto. Nessa análise foi usado o modelo de elementos discretos em um modelo bidimensional. Os autores reconhecem que a análise bidimensional pode agravar um pouco a divergência dos resultados experimentais e numéricos.

No presente trabalho a versão estudantil do *software* ABAQUS[®] foi utilizada, desta forma, devido a limitação imposta a essa versão (em número de elementos) desenvolveu-se um modelo bidimensional em elementos finitos. Duas geometrias bidimensionais básicas foram construídas e avaliadas: uma contendo as placas de cravação no topo e base da amostra; outra sem placas, visando representar a não cravação e ou inexistência da placa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS.

Neste capítulo são abordados os métodos utilizados de modo a tornar o trabalho reproduzível. Os materiais e meios utilizados para tal também são descritos.

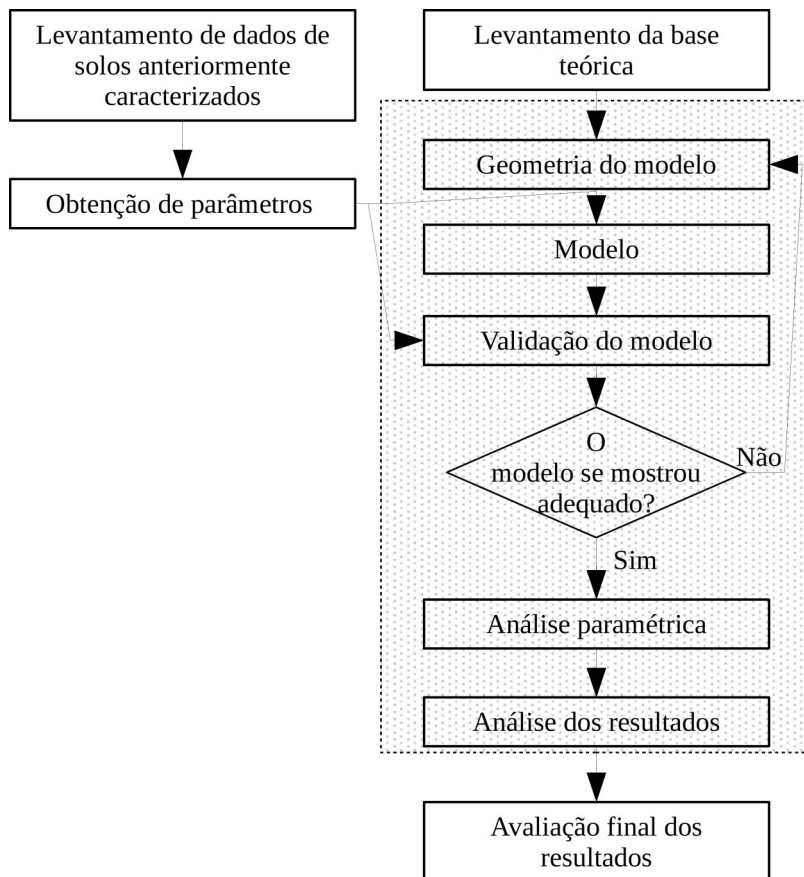
A Figura 8 descreve, por meio de um diagrama as fases do trabalho. Nela destaca-se que após pesquisa inicial para embasamento teórico, foi feita uma busca por dados de solos anteriormente caracterizados. Dos dados obtidos foram feitas novas interpretações para então proceder a modelagem.

Para a obtenção dos modelos, além dos dados de entrada é necessário o desenvolvimento das geometrias e das condições de contorno. Com isso definido é possível proceder a avaliação inicial, para verificar se os modelos são capazes de representar as curvas de tensão do ensaio de laboratório. Caso um modelo (ou modelos) não seja aprovado é necessário se repensar a geometria ou toda a concepção.

Com a avaliação inicial feita e compreendendo o comportamento do modelo em relação ao comportamento do corpo de prova, é possível se trabalhar com os modelos de forma a buscar outros resultados. No presente trabalho foram feitas análises paraméricas e a análise quanto à influência da cravação da placa dentada.

Os procedimentos destacados com hachura (Figura 8) foram repetidos para as modelagens obtidas com os comportamentos elastoplásticos com envoltória de Mohr-Coulomb e *Clay Plasticity*, do ABAQUS®.

Figura 8: Fluxo de trabalho.



3.1 Modelagem numérica

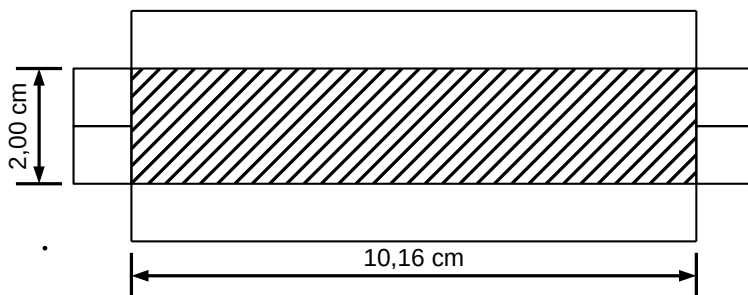
A escolha da *software* se baseou na disponibilidade de licença, na possibilidade de execução e na qualidade das análises obtidas. Foi obtida a licença gratuita do *software ABAQUS® Student Edition*, cuja limitação em relação à versão completa é que se pode modelar apenas 1000 nós.

O modelo utilizado é bidimensional e representando a seção central do corpo de prova, na direção da força cisalhante.

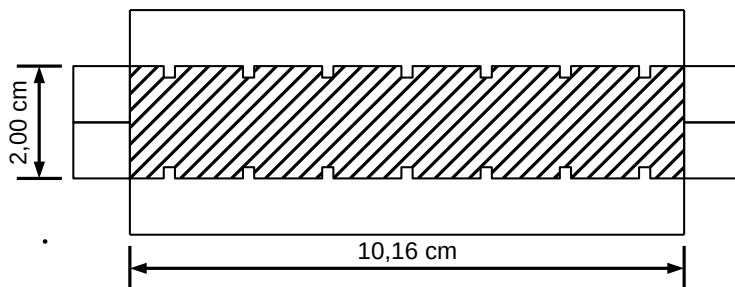
As geometrias dos modelos foram inspiradas no equipamento utilizado para a execução dos ensaios de cisalhamento direto no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC, ou seja, com lado de 4 polegadas (ou 10,16 cm) e altura de 2,00 cm (Figura 9). Foram representadas seções na direção da força cisalhante.

A fim de averiguar a influência da cravação dos dentes da placa dentada à amostra foram feitas duas geometrias semelhantes, uma com as placas lisas que é chamada nesse trabalho de geometria com placa lisa (Figura 9 - a) e outra com os dentes da placa, no presente trabalho pode ser chamada de geometria com placa dentada (Figura 9 - b).

Figura 9: Geometrias dos modelos.



a) Modelo com placa lisa.



b) Modelo com placa dentada.

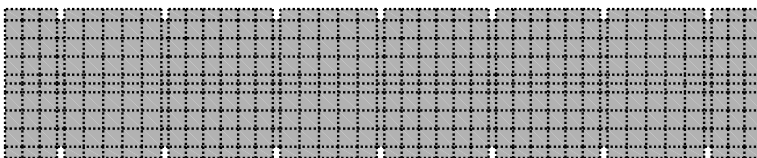
Os dentes da geometria com placa dentada foram baseados na placa dentada para solos rijos do laboratório de Mecânica dos solos da UFSC (Figura 4), que possui dentes mais espaçados. Essa placa possui

sete linhas de dentes, cada dente com 0,15 cm de altura e 0,1 cm de largura.

No modelo em elementos finitos, o formato dos elementos que constituem a malha do corpo de prova em ambas as concepções de geometria são retangulares e possuem tamanho e distribuição semelhantes.

Para o componente (*part*) que representa o corpo de prova dos modelos com placa dentada foram adotados 446 elementos (Figura 10 – a) do tipo CPE4P, ou seja, são elementos planos com quatro nós para cálculo de tensões e deslocamentos e poropressão bilineares. Para a parte que representa o solo nos modelos com placa lisa foram adotados 258 elementos (Figura 10 - b) do tipo CPE4P (o mesmo usado nos modelos com placa dentada). A diferença no número de elementos se deve principalmente à modelagem dos dentes, que restringiu a construção de elementos, aumentando o número nos modelos com placa dentada.

Figura 10: Malhas dos modelos.



a) Modelo com placa dentada.



b) Modelo com placa lisa.

Além do corpo de prova, foram modeladas as caixas de cisalhamento como elementos perfeitamente elásticos, adotando-se grande módulo de elasticidade. Esses elementos têm um caráter apenas auxiliar no modelo e não são analisados.

Para garantir a interação entre os elementos do modelo que representam o corpo de prova e os elementos que representam a caixa de cisalhamento, foram definidos contatos de superfícies do tipo *surface-to-surface contact* entre essas partes. Nesse tipo de contato pode-se definir um coeficiente de tensão tangencial à superfície, usou-se 0,30 para todas

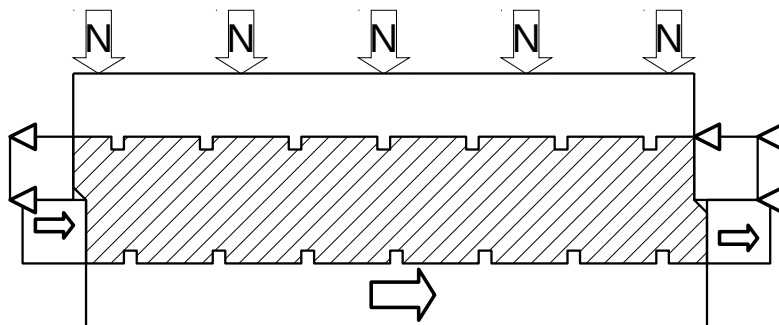
as simulações da placa dentada. No caso da geometria com placa lisa, esse coeficiente foi proporcionalmente ajustado de acordo com a tangente do ângulo de atrito (DADALTO E DAKMONECH, 2015).

Tendo em vista as premissas do cisalhamento direto, o componente que representa o corpo de prova foi modelado de forma a sempre se comportar de forma drenada, ou seja, as tensões sempre são tensões efetivas no modelo.

Para as simulações foram modelados três passos de cálculo:

- O primeiro, chamado nesse trabalho de geostático, tem a finalidade de dar as condições iniciais ao modelo. Nesse passo foi aplicado 5 kPa de tensão confinante, além das condições de drenagem (necessárias ao modelo).
- O segundo passo, chamado aplicação de N , foi o passo de cálculo usado para aplicar o esforço normal (N) desejado à placa superior, que transmite ao corpo de prova (CP). Neste passo, a amostra é restringida pela ação das reações de superfícies aplicadas entre o CP e os elementos que formam as caixas. Por sua vez os elementos que compõe as caixas possuem restrição de movimentos nas direções x (notação 11) e y (notação 22), além da restrição de rotação (direção com notação 12) (Figura 11).
- O último passo, de maior interesse desse trabalho, foi o passo chamado de cisalhamento, nele a restrição da metade superior da caixa foi mantida. Também aplicou-se à placa (dentada ou lisa) superior um único ponto com restrição de movimento em x (notação 11), direção horizontal, mas com o movimento permitido na vertical e na rotação. À parte inferior da caixa e à placa (dentada ou lisa) localizada na parte inferior da amostra foi imposto deslocamento, semelhante ao que acontece no ensaio (Figura 11).

Figura 11: Modelo esquemático, fase de cisalhamento.



3.2 Modelagem pelo modelo elastoplástico com critério de ruptura Mohr-Coulomb

O critério de Mohr-Coulomb, como já citado no Capítulo 2.1 é a simplificação do critério de Mohr, sendo a envoltória de ruptura uma reta.

Na modelagem por elementos finitos usando o modelo elastoplástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb o material modelado se comporta de forma perfeitamente elástica enquanto o círculo de Mohr não toca a envoltória, porém quando isso acontece o elemento passa a apresentar comportamento plástico (ABAQUS, 2014).

Nesse tipo de modelagem os dados que caracterizam o comportamento do material (solo) devem descrever a envoltória de ruptura, sendo estes a coesão (c) e o ângulo de atrito (ϕ); a fase de deformações elásticas é descrita pelo módulo de elasticidade (E) e pelo coeficiente de Poisson (ν); além da fase de deformações plásticas, descrita pelo ângulo de dilatação (ψ) (adotado como nulo para esse trabalho).

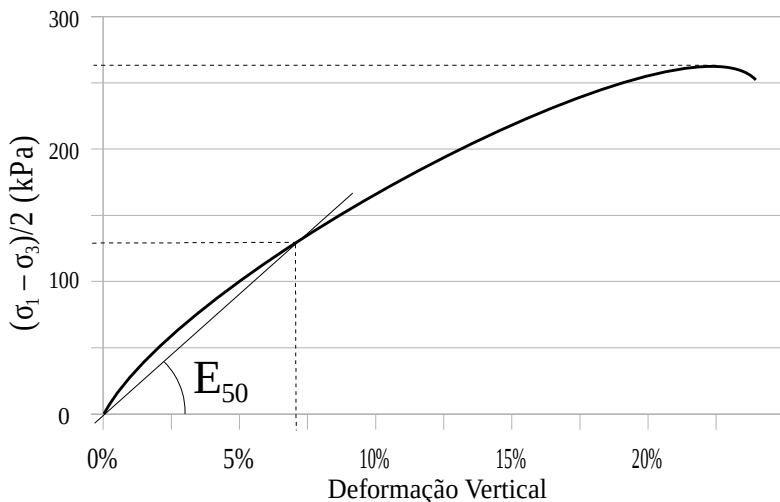
3.2.1 Obtenção de parâmetros do solo

Os parâmetros usados nessa modelagem numérica foram obtidos de ensaios laboratoriais realizados para a dissertação de mestrado de Godoi (2014). O autor realizou diversos ensaios para, segundo ele, “uma

caracterização geomecânica de um perfil de solo residual classificado geologicamente como orto-gnássico”.

O módulo de elasticidade (E) usado na modelagem foi o módulo secante E_{50} , de modo a evitar o trecho mais rígido, no início das deformações da amostra no ensaio triaxial. O Módulo de elasticidade E_{50} é obtido graficamente pela tangente de uma linha que, no gráfico da tensão deformação do ensaio triaxial, vai da origem ao ponto que corresponde a tensão de 50% da tensão diferencial última (Figura 12).

Figura 12: Obtenção do modulo de elasticidade E_{50} .



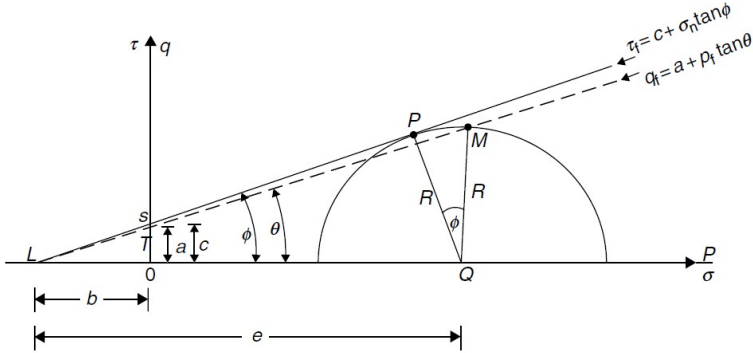
Fonte: Adaptado de Godoi, 2014.

O ângulo de atrito (ϕ) pode ser obtido do ensaio triaxial por meio da envoltória de ruptura traçada entre os círculos de Mohr. A recomendação é que sejam feitos ao menos três ensaios para traçar a melhor reta, porém quando existem mais de dois círculos, a obtenção da envoltória torna-se complexa por esse método. Das (2014) apresenta a Equação 4, para a determinação da reta entre dois círculos de Mohr.

$$\phi'_1 = 2 \cdot \left\{ \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{\sigma'_{1(1)} - \sigma'_{1(2)}}{\sigma'_{3(1)} - \sigma'_{3(2)}} \right]^{0,5} - 45^\circ \right\} \quad (4)$$

Dessa forma buscou-se a obtenção do ângulo de atrito por meio da envoltória dos caminhos de tensão, no domínio p - q (Figura 13). Nesse domínio foram traçados os pontos que representam cada círculo. A melhor reta foi traçada a partir dos pontos e foram obtidos o coeficiente angular $\tan(\theta)$ e o coeficiente linear a .

Figura 13: Diferença entre as envoltórias nos domínios τ - σ e P - q .



Fonte: Modificado de Bodó e Jones, 2013.

Assim, segundo as deduções de Lambe e Withman (1969) obtêm-se a Equação 5, relacionando os ângulos θ e ϕ .

$$\phi = \sin^{-1}(\tan \theta) \quad (5)$$

De forma semelhante, para obter a coesão (c) a partir dos ensaios triaxiais, esses autores relacionaram os interceptos das ordenadas dos dois domínios (Equação 6).

$$c = \frac{a}{\tan \theta} \cdot \frac{\tan \theta}{\cos \phi} \therefore c = \frac{a}{\cos \phi} \quad (6)$$

O valor de coeficiente de Poisson (ν) usado no trabalho se baseia nos valores característicos apresentados por Teixeira e Godoy (1998) (Tabela 1) e na classificação do perfil de solo realizada por Godoi (2014), que constatou que se tratavam de solos variando de silto-arenoso a areno-siltoso.

Tabela 1: valores característicos do coeficiente de Poisson.

Solo	ν
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,3 ~ 0,5
Argila saturada	0,4 ~ 0,5
Argila não saturada	0,1 ~ 0,3

Fonte: Teixeira e Godoy, 1998.

Dessa forma, o coeficiente de Poisson utilizado para todos as modelagens baseadas nesse perfil de solo foi 0,3.

Godoi (2014) apresenta os principais resultados dos ensaios de cisalhamento direto por meio da Tabela 2.

Tabela 2: Principais resultados do ensaio de cisalhamento direto (c e ϕ)

Amostra	Inundado		Não inundado	
	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
01	13	37,9	13,2	41,5
02	4,2	39,2	14,4	39,5
03	17,1	36,7	17,1	42,1
04	10,4	32,8	25,9	34,4
05	11,6	35,1	27,3	34,3

Fonte: Adaptado de Godoi, 2014.

Como dados de entrada para a modelagem numérica foram usados os dados de coesão e ângulo de atrito retirados de ensaios triaxiais. Para a obtenção desses dados foi usada a interpretação realizada por Godoi (2014) (Tabela 3).

Tabela 3: Coesão e ângulo de atrito (c' e ϕ') obtidos do ensaio triaxial.

Amostra	c' (kPa)	ϕ' (°)
01	18	30
02	45	29
03	37	27
04	31	25
05	37	25

Fonte: Adaptado de Godoi, 2014.

Outro dado de entrada obtido do ensaio triaxial é o módulo de elasticidade E_{50} . Para cada nível de tensão confinante foi obtido um módulo de elasticidade. Por esse motivo o módulo de elasticidade a ser utilizado no modelo deve ser compatível com a tensão normal aplicada nos estágios do ensaio de cisalhamento direto. A Tabela 4 apresenta os valores obtidos de E_{50} . Foram omitidos os módulos de elasticidade obtidos com tensões confinantes maiores que 150 kPa, visto que as tensões atuantes na amostra durante o ensaio de cisalhamento direto se mantêm abaixo desse valor.

Tabela 4: Valores obtidos do ensaio triaxial de E_{50} .

Amostra	σ_3 (kPa)	E (Pa)
05	20	3,1 e6
	80	5,0 e6
	150	5,7 e6
04	20	3,0 e6
	80	3,7 e6
	150	5,0 e6
01	20	1,4 e6
	80	5,0 e6
	150	5,4 e6
02	20	9,5 e6

Tabela 4: Valores obtidos do ensaio triaxial de E_{50} .

Amostra	σ_3 (kPa)	E (Pa)
03	80	3,7 e6
	150	4,1 e6
	20	3,8 e6
	80	4,5 e6
	150	5,2 e6

3.3 Modelagem pelo modelo elastoplástico *clay-Plasticity*

A definição do modelo elastoplástico determina o comportamento do material em suas fases elástica e plástica. O modelo *clay plasticity* descreve o comportamento inelástico de solos coesivos (ABAQUS, 2014). O modelo *clay-plasticity* é uma extensão do modelo *cam-clay* modificado.

Nesse modelo, são necessários alguns parâmetros para descrever o comportamento do solo. Dentre eles podem ser citados o índice de compressão (λ), a inclinação da linha do estado crítico (M), o tamanho a da superfície elíptica (sendo a metade da pressão de consolidação inicial do material), o índice de recompressão (κ), além de parâmetros extras de ajuste (não utilizados nesse trabalho).

3.3.1 Obtenção de parâmetros do solo

O modelo elastoplástico *clay-plasticity* busca reproduzir o comportamento do solo apresentado no ensaio de compressão confinada. Dessa forma, os parâmetros do modelo (λ , κ e a) podem ser obtidos como função dos parâmetros adquiridos por meio desse ensaio. A exceção é o parâmetro M , a inclinação da linha do estado crítico do modelo, que é função do ângulo de atrito (ϕ).

O tamanho da superfície elíptica de ruptura (a) tem valor numérico igual à metade da pressão de pré adensamento p'_{co} . No trabalho em questão considerou-se $p'_{co} = \sigma'_{vm}$ (tensão virtual de pré adensamento).

Nas caracterizações de amostras feitas durante o trabalho de Godoi (2014) foram realizados diversos de compressão confinada. Desses ensaios foram obtidos os valores do coeficiente de compressão (c_c), do coeficiente de recompressão (c_r) e do índice de vazios inicial (e_0) para a caracterização do modelo *clay-plasticity* (Tabela 5).

Tabela 5: Principais resultados do ensaio de compressão confinada (c_c e c_r e e_0)

Amostra	p'_{co} (kPa)	C_c	C_r	e_0
01	480	0,45	0,02	0,812
02	230	0,32	0,05	0,857
03	320	0,34	0,05	0,984
04	230	0,37	0,07	1,138
05	354	0,54	0,05	1,04

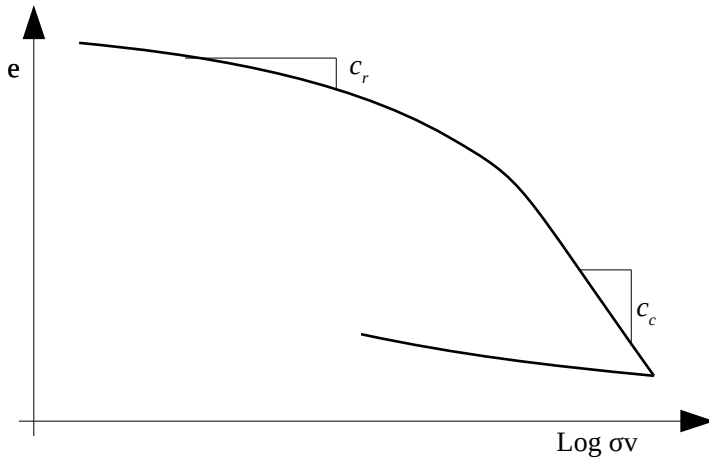
Fonte: Godoi, 2014.

O coeficiente de compressão (c_c) e o coeficiente de recompressão (c_r) são obtidos a partir do ensaio de compressão confinada, pela relação entre o aumento da pressão confinante e a diminuição do índice de vazios (Equação 7).

$$c_c = \frac{P_2 - P_1}{\log e_1 - \log e_2} \quad (7)$$

Esses coeficientes diferem-se apenas em relação ao nível de tensão (Figura 14): o coeficiente de recompressão é obtido em níveis menores, aos quais o solo já havia sido submetido, enquanto o índice de compressão é obtido em níveis mais elevados de tensão (HEAD e EPPS, 2011).

Figura 14: Curva típica do ensaio de adensamento.



Fonte: Adaptado de Das, 2014.

Além dos parâmetros obtidos pelo ensaio de compressão confinada, para a caracterização do modelo ainda é necessário o ângulo de atrito, obtido do ensaio triaxial, como descrito no sub-item 3.2.1.

O índice de compressão (λ) pode ser obtido como função do Coeficiente de compressão (c_c) (Equação 8).

$$\lambda = \frac{c_c}{1 + e_0} \quad (8)$$

De forma semelhante, o índice de recompressão (κ) pode ser obtido como função do Coeficiente de recompressão (c_r) (Equação 9).

$$\kappa = \frac{c_r}{1 + e_0} \quad (9)$$

A inclinação da linha do estado crítico (M) é função do ângulo de atrito, e pode ser obtida pela seguinte equação:

$$M = \frac{6 \cdot \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad (10)$$

Dessa forma, os parâmetros de entrada para o modelo, relativos aos dados amostrais, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros das amostras do modelo *clay-plasticity*

Amostra	λ	κ	M
01	0,248	0,011	1,20
02	0,172	0,027	1,16
03	0,171	0,025	1,07
04	0,173	0,033	0,98
05	0,265	0,025	0,98

Fonte: Godoi (2014).

4 RESULTADOS

4.1 Avaliação dos modelos

Para fazer uma avaliação inicial dos modelos bidimensionais obtidos, as curvas do ensaio de cisalhamento direto (inundado) de Godoi (2014) foram plotadas juntas às curvas obtidas realizando-se a modelagem numérica pelo método dos elementos finitos.

Apenas as curvas de um dos estágios dos ensaios do cisalhamento direto foram usadas para essa avaliação do modelo. Usaram-se as curvas do estágio no qual a tensão normal (N) aplicada ao corpo de prova foi de 78 kPa. Para essa comparação, as tensões aplicadas ao corpo de prova modelado foram de 85 kPa, dessa forma, para amenizar o efeito das diferenças entre as tensões normais, os gráficos comparativos foram gerados de forma a expressar a tensão resistente ao cisalhamento normalizada pela tensão normal (τ/N).

4.1.1 Avaliação do modelo com envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb

Para cada amostra de solo usada nessa avaliação, foram buscados nos resultados do ensaio triaxial de Godoi (2014) os parâmetros de ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) de acordo com as tensões residuais. O módulo de elasticidade (E_{50}) também foi obtido dos ensaios triaxiais, esse parâmetro foi encontrado no estágio cuja tensão confinante fosse mais próxima àquela aplicada ao corpo de prova durante o estágio do ensaio de cisalhamento direto usado para a comparação (78 kPa). A Tabela 7 apresenta, para cada amostra, os valores dos parâmetros utilizados para realizar a comparação.

Tabela 7: valores para a avaliação do modelo (Mohr-Coulomb).

Amostra	c (kPa)	ϕ	E_{50} (MPa)
01	18	30°	5,7
02	45	29°	3,7
03	37	27°	4,5
04	31	25°	3,7
05	37	25°	5,0

É possível observar que as curvas obtidas do modelo numérico apresentam uma mudança de inclinação da curva mais brusca. No caso das amostras 03 (Figura 17), 04 (Figura 18) e 05 (Figura 19), a resistência ao cisalhamento de pico é semelhante aos resultados obtidos em laboratório, porém isso não acontece com as amostras 01 (Figura 15) e 02 (Figura 16): a amostra 01 apresenta maior resistência ao cisalhamento de pico no ensaio de laboratório que o previsto pelo modelo, oposto do que resultado da amostra 02. Além de outros fatores, essa diferença pode ser gerada pelo método de tomada dos parâmetros de resistência, essas foram obtidas a partir dos resultados do ensaio triaxial, não do próprio ensaio de cisalhamento direto. Além disso a envoltória é obtida pela melhor reta, portanto cada ponto apresenta alguma variação em relação à envoltória.

Contudo, de maneira geral é possível afirmar que o modelo consegue representar o comportamento típico da curva tensão x deformação do ensaio de cisalhamento direto.

Figura 15: Avaliação inicial do modelo com envoltória de Mohr Coulomb (Amostra 01).

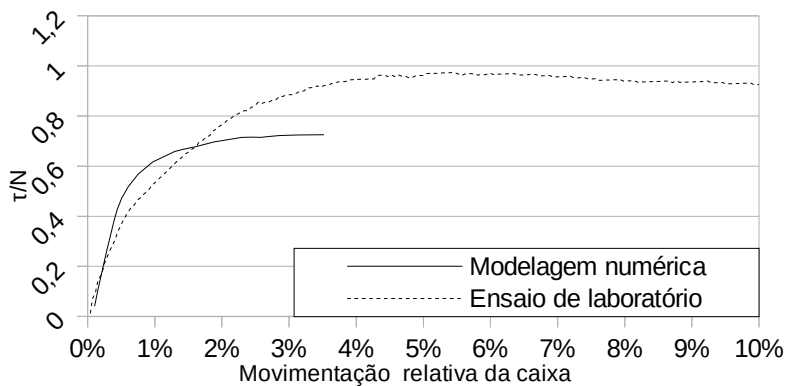


Figura 16: Avaliação inicial do modelo com envoltória de Mohr Coulomb (Amostra 02).

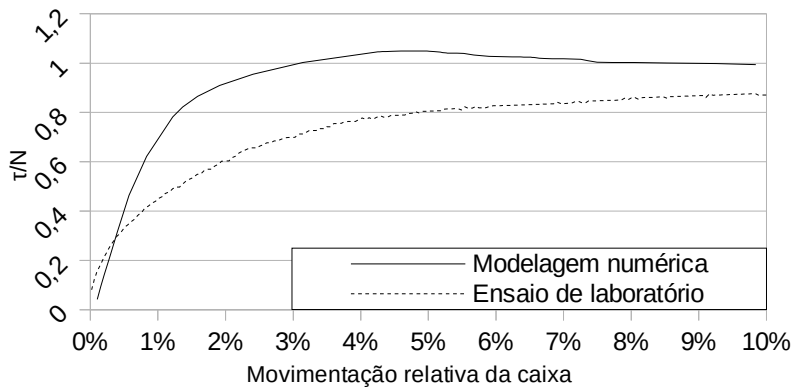


Figura 17: Avaliação inicial do modelo com envoltória de Mohr Coulomb (Amostra 03).

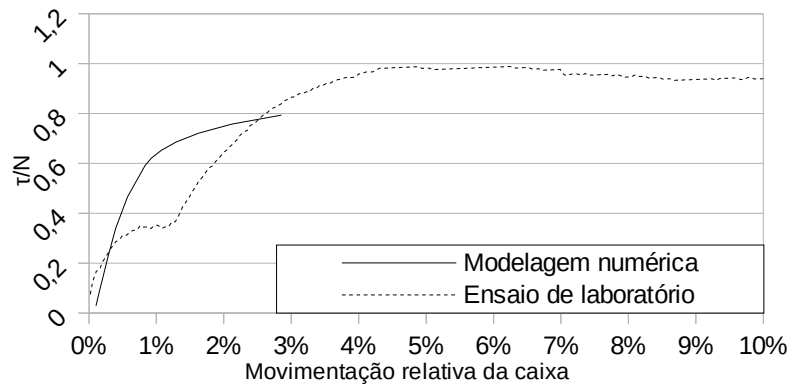


Figura 18: Avaliação inicial do modelo com envoltória de Mohr Coulomb (Amostra 04).

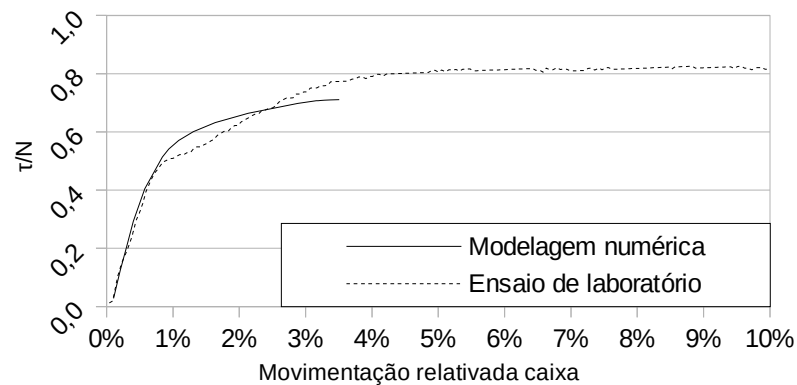
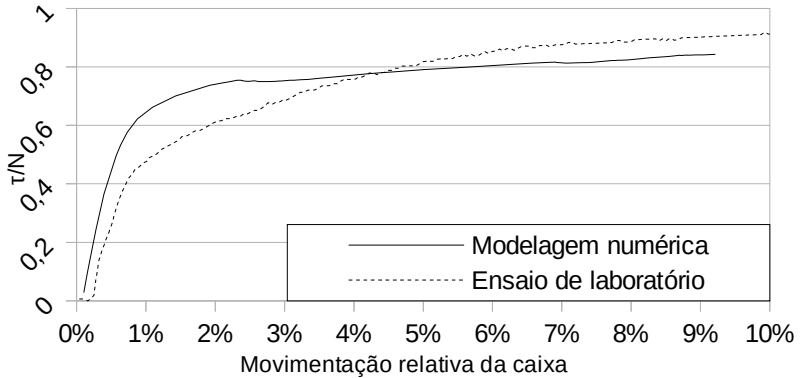


Figura 19: Avaliação inicial do modelo com envoltória de Mohr Coulomb (Amostra 05).



Outra questão a ser observada é que apesar da tentativa de levar o modelo até a movimentação da caixa de 10 mm (9,84 %), os cálculos podem ser interrompidos em progressos de cálculo que representam movimentações inferiores a essa devido a instabilidades numéricas (problemas de convergência). Nas Figuras 15, 17 e 18, por exemplo, pode ser observado que a curva obtida a partir da simulação não segue até a movimentação desejada da caixa. Isso pode ocorrer em alguns casos devido a alguma instabilidade numérica encontrada em um incremento de cálculo.

4.1.2 Avaliação do modelo com *Clay-plasticity* (ABAQUS®)

Para cada amostra de solo ensaiada por Godoi (2014) foram buscados, ou calculados a partir de valores apresentados, os valores de índice de vazios inicial (e_0), inclinação da superfície crítica (M), pressão de consolidação inicial ($p_{co} = a/2$), índice de recompressão (κ) e índice de compressão (λ). A Tabela 8 apresenta os valores desses parâmetros usados para cada uma das amostras na avaliação preliminar do modelo.

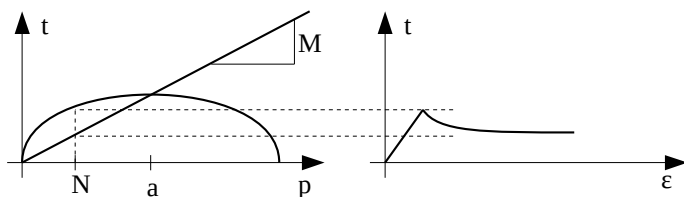
Tabela 8: valores para a avaliação do modelo (*clay-plasticity*).

Amostra	e_0	M	a (kPa)	κ	λ
01	0,812	1,20	240	0,0110	0,248
02	0,857	1,16	115	0,0269	0,172
03	0,984	1,07	160	0,0252	0,171
04	1,138	0,98	115	0,0327	0,173
05	1,039	0,98	177	0,0245	0,264

As Figuras 21, 22, 23, 24 e 25 apresentam as curvas sobrepostas do estágio intermediário do ensaio de cisalhamento direto feito por Godoi (2014) e a curva obtida pela simulação numérica, medindo a reação dos apoios das caixas. Nas abscissas dos gráficos foi representada a movimentação relativa da caixa e na ordenada foi representada a tensão cisalhante normalizada pelo esforço normal (τ/N).

Nota-se que no resultado numérico surge pico de resistência. Esse comportamento não é comum ao modelo *cam-clay* modificado, mas é uma das possibilidades de ajuste implementada no modelo *clay-plasticity* do ABAQUS®. O pico é devido ao valor de pré adensamento, correlato ao parâmetro a . Segundo Helwany (2007), no ABAQUS®, quando o parâmetro a (metade da tensão de pré consolidação) ultrapassa a tensão confinante, o pico de resistência ocorre (Figura 20).

Figura 20: Tensão cisalhante desenvolvida quando $N < a$.



Fonte: Modificado de ABAQUS®, 2014.

Nota-se que nas amostras 02 (Figura 22), 03 (Figura 23) e 05 (Figura 25) a máxima tensão cisalhante é semelhante para resultados do ensaio de laboratório e na modelagem, porém nas amostras 01 (Figura

21) e 04 (Figura 24) as tensões máximas são consideravelmente diferentes. A modelagem numérica referente a amostra 01 apresenta um grande pico de resistência, esse resultado pode ser atribuído ao valor de tensão de pré adensamento virtual que a amostra demonstrou no ensaio de adensamento (480 kPa).

Figura 21: Amostra 01, avaliação inicial do modelo - *clay-plasticity*.

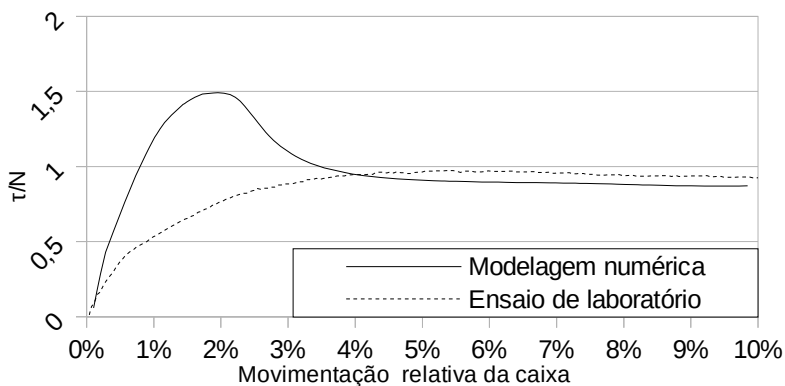


Figura 22: Amostra 02, avaliação inicial do modelo - *clay-plasticity*.

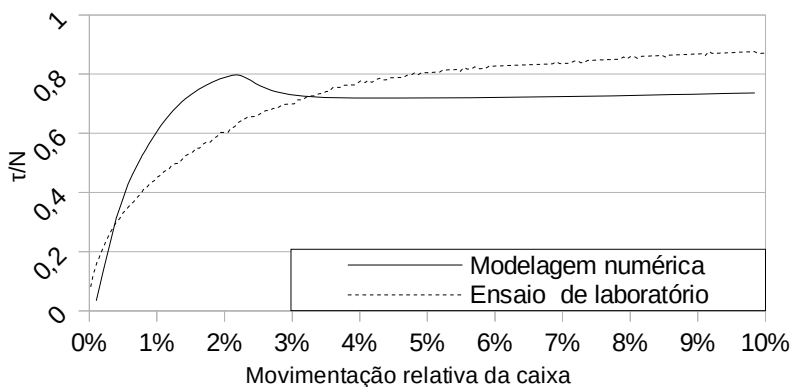


Figura 23: Amostra 03, avaliação inicial do modelo - *clay-plasticity*.

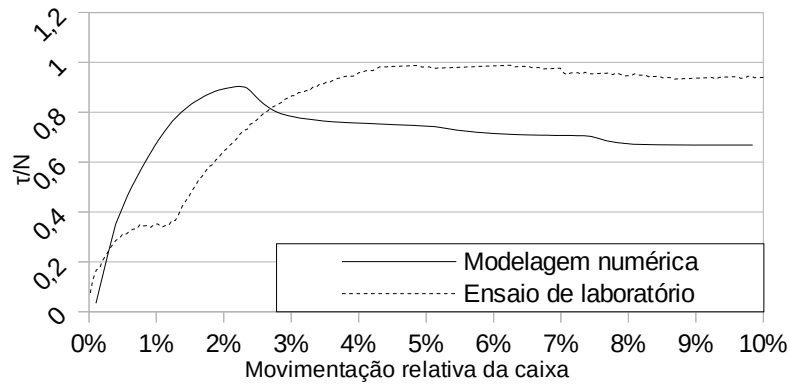


Figura 24: Amostra 04, avaliação inicial do modelo - *clay-plasticity*.

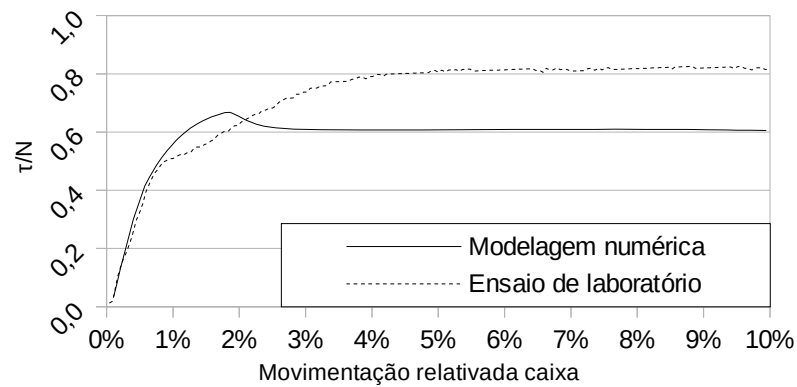
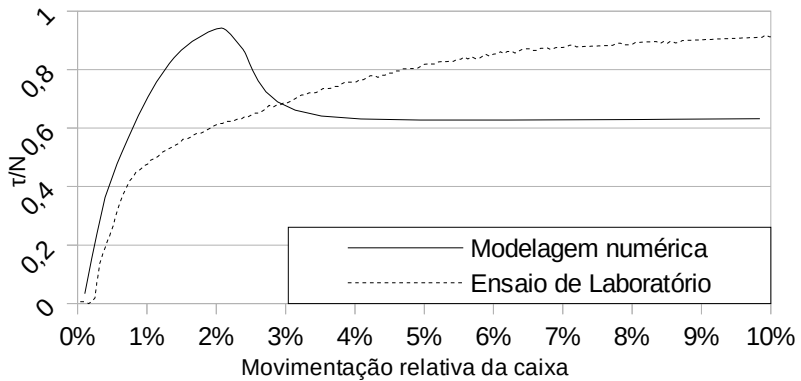


Figura 25: Amostra 05, avaliação inicial do modelo – *clay-plasticity*.



Com a intenção de diminuir ou até extinguir o pico de resistência que, nos casos estudados nesse trabalho, é resultado apenas da simulação numérica, o parâmetro α , ligado a tensão de pré adensamento poderia ser ajustado de modo a calibrar o modelo. Contudo, mesmo com diferença nos formatos da curva, ou seja, surgimento do pico de resistência no resultado numérico, o modelo se mostra capaz de chegar a níveis de tensão semelhantes aos níveis de tensão do ensaio de laboratório.

4.2 Análise Paramétrica

Após a avaliação inicial do modelo demonstrar a capacidade do modelo em descrever o comportamento típico do material, foram feitas as análises paramétricas. Para os modelos usados na análise paramétrica, em relação à análise preliminar, foi usada a mesma geometria (ou similar, quando se usou a geometria com placa lisa) e os mesmos modelos de comportamento do material.

4.2.1 Análise paramétrica das simulações utilizando o modelo elastoplástico com envoltória de Mohr-Coulomb

Foram feitas análises paramétricas em relação a quatro parâmetros nas simulações realizadas por meio do o modelo

elastoplástico com envoltória de Mohr-Coulomb. Foram avaliados o módulo de elasticidade (E), o esforço normal aplicado ao corpo de prova durante o ensaio (N), e os parâmetros de resistência: coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ).

As análises foram feitas a partir de valores de referência de cada parâmetro, que foram, separadamente perturbados para um valor maior e outro menor. Os valores de referência assim como os valores perturbados são apresentados na Tabela 9. Ou seja, variou-se E de 1 a 10 MPa, c de 5 a 40 kPa, ϕ de 5 a 35° e N de 38 a 133 kPa.

Tabela 9: valores para a análise paramétrica no modelo elastoplástico com envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb

Parâmetro	Valor menor	Valor de referência	Maior valor
E	1 MPa	3 MPa	10 MPa
c	5 kPa	20 kPa	40 kPa
ϕ	5°	20°	35°
N	38 kPa	85 kPa	133 kPa

Para cada parâmetro analisado foi gerado um gráfico com três curvas, uma para cada valor do parâmetro. A abscissa desses gráficos representa a movimentação relativa da caixa enquanto a ordenada foi definida de acordo com a grandeza considerada mais adequada para análise.

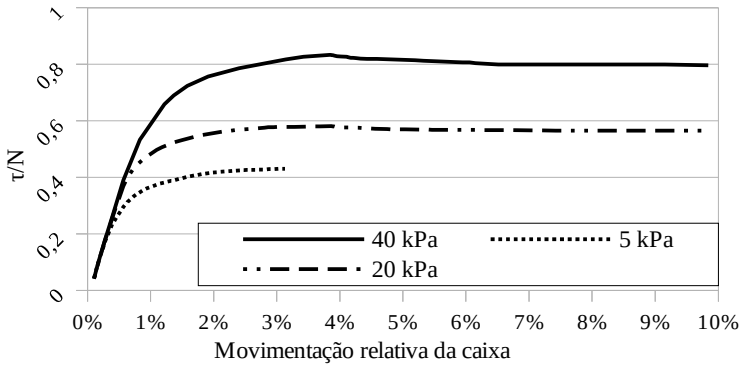
4.2.1.1 Modelo com placa dentada

Nas avaliações para o modelo com placa dentada geometria utilizada (Figura 10) foi idêntica a utilizada na avaliação inicial do modelo, com sete dentes equidistantes em cada placa dentada.

Nas figuras 26 a 29 apresentam-se os resultados para variação da coesão, módulo de elasticidade, ângulo de atrito e esforço normal, respectivamente.

A Figura 26 a foi obtida pela variação da coesão. Os valores utilizados foram 5, 20 e 40 kPa, mantendo constantes os outros parâmetros. Como esperado, de maneira geral, observa-se que um incremento na coesão aumenta a resistência ao cisalhamento.

Figura 26: Análise paramétrica de acordo com a coesão (placa dentada)



Numa análise mais criteriosa, é possível observar que no início da movimentação da caixa as curvas mantêm-se unidas (rigidez semelhante), além disso, as três curvas apresentam comportamento semelhante, diferenciando-se de acordo com o início da plastificação, que ocorre em diferentes níveis de movimentação da caixa, ou seja, quando a amostra apresenta maior resistência ao cisalhamento é necessário aplicar uma maior deformação para a máxima mobilização de resistência.

A máxima resistência ao cisalhamento pode ser analisada de acordo com o critério de resistência de Mohr-Coulomb. Para obter o parâmetro apresentado na ordenada do gráfico de análise (τ_f/N) é necessário dividir a equação de resistência original de Mohr-Coulomb pelo esforço normal (Equação 11).

$$\frac{\tau_f}{N} = \tan \phi + \frac{c}{N} \quad (11)$$

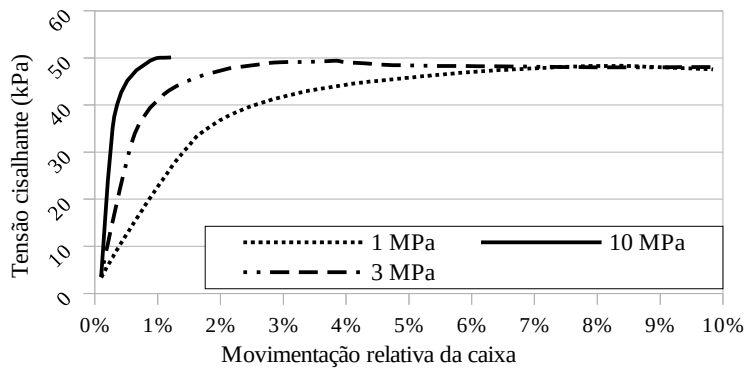
De acordo com essa equação pode-se notar a boa previsibilidade do modelo, visto que os valores τ_f/N obtidos pela modelagem numérica são próximos aos valores calculados pela equação de resistência, como mostra a comparação exposta na Tabela 10.

Tabela 10: valores de τ_f/N na análise paramétrica em relação a c .

Curva	τ_f/N (simulação numérica)	τ_f/N (calculado)	Divergência
5 kPa	0,43	0,42	2%
20 kPa	0,58	0,60	-3%
40 kPa	0,83	0,83	0%

A Figura 27 apresenta as curvas obtidas da simulação por elementos finitos, para os diferentes valores de módulo de elasticidade atribuídos ao modelo. Percebe-se que o módulo de elasticidade não tem grande influência quanto a máxima resistência apresentada pela amostra (as curvas tendem todas para valores muito próximos). Nota-se claramente a influência desse parâmetro em relação a mobilização da resistência: quanto menor o módulo de elasticidade, mais lentamente a resistência do solo é mobilizada.

Figura 27: Análise paramétrica de acordo com o módulo de elasticidade (placa dentada)



Comparando com os outros parâmetros analisados nesse subitem, o módulo de elasticidade é o único que demonstrou ter influência sobre o comportamento inicial do corpo de prova (durante o início da movimentação da caixa), ou seja, na fase elástica de comportamento. Essa constatação é esperada tendo em vista o modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb, nele o módulo de elasticidade é o único parâmetro que

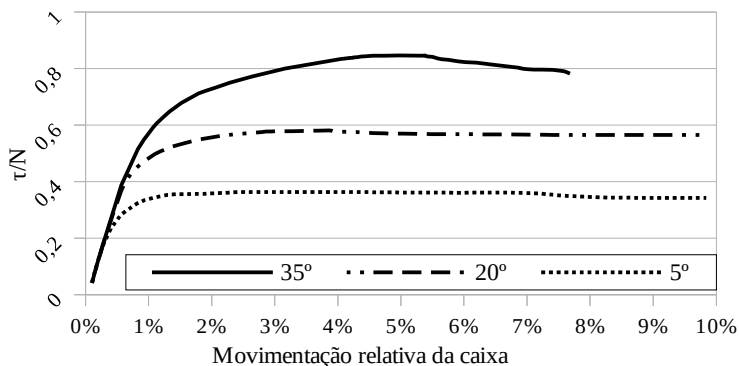
descreve a relação entre a tensão e a deformação na fase elástica. Cabe destacar que de acordo com Lambe e Withman (1969), quando analisado o comportamento típico de solos, percebe-se que a rigidez do solo varia de acordo com a tensão confinante. Neste sentido, para que o comportamento do modelo fosse similar ao observado em ensaios de laboratório o módulo E_{50} deveria ser ajustado nas análises de acordo com o nível de tensões.

A análise paramétrica em relação ao ângulo de atrito é apresentada na Figura 28. Na ordenada do gráfico é representada a resistência ao movimento normalizada pelo esforço normal aplicado ao corpo de prova (τ/N) e na abscissa, a movimentação relativa da caixa.

De maneira geral, é possível observar que quanto maior o ângulo de atrito, maior a resistência atingida. Também constata-se que quanto menor o ângulo de atrito atribuído à curva, menos movimentação da caixa é necessária para o início da plastificação.

Não é observada influência do ângulo de atrito no início da movimentação da caixa, as curvas se diferenciam apenas em movimentações maiores, com o início da plastificação.

Figura 28: Análise paramétrica de acordo com o ângulo de atrito (placa dentada)



Quanto a máxima resistência ao cisalhamento, pode-se fazer uma análise em relação à equação 11, comparando os valores obtidos por meio da modelagem numérica e os valores calculados por essa equação. De acordo com os dados de entrada, para o modelo gerado com ângulo de atrito de 5°, era esperado que o fator τ/N fosse de 0,32, porém por meio da modelagem foi obtido o valor de 0,36; de forma semelhante,

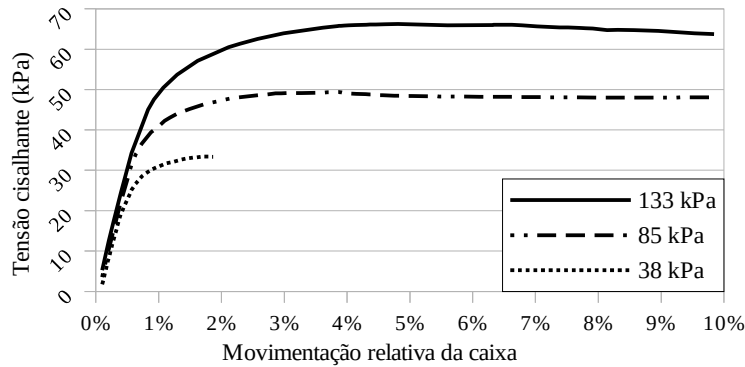
para 20° era esperado um valor de 0,60 e foi obtido τ_f/N igual a 0,58; para a modelagem com ângulo de atrito de 35° era esperado τ_f/N igual a 0,94 e foi obtido 0,85. A Tabela 11 demonstra esses valores de forma mais direta, deixando clara a divergência associada.

Tabela 11: valores de τ_f/N na análise paramétrica de ϕ .

Curva	τ_f/N (simulação numérica)	τ_f/N (calculado)	Divergência
5°	0,36	0,32	13%
20°	0,58	0,58	0%
35°	0,85	0,85	0%

Na Figura 29 são mostradas as curvas referentes a análise paramétrica quanto ao esforço normal (N) aplicado. É possível observar que a resistência ao cisalhamento é maior quando a amostra está submetida a maiores esforços normais.

Figura 29: Análise paramétrica em relação a N (placa dentada)



Ao contrário do que ocorre experimentalmente Lambe e Withman (1969), a rigidez do solo não aumenta de acordo com o acréscimo de tensão confinante.

Quando se faz a análise paramétrica em relação ao esforço normal, cria-se uma situação semelhante ao procedimento realizado no ensaio de cisalhamento direto: para amostras de solo semelhantes se

executam diversos estágios, rompendo o corpo de prova a diferentes tensões normais com o intuito de obter uma envoltória de ruptura em função de c e ϕ . Com o intuito de realizar uma avaliação complementar do modelo e também avaliar aspectos da fase de cisalhamento do ensaio de cisalhamento direto foi feita uma retroanálise. A retroanálise consiste em traçar as curvas de máxima resistência ao cisalhamento em função da tensão confinante da modelagem e a partir destas verificar os parâmetros de resistência, c e ϕ , obtidos.

A retroanálise foi feita a partir do esforço normal aplicado ao modelo e das leituras de reação feitas nos apoios da caixa não movimentada (de forma semelhante às leituras feitas no ensaio de laboratório). Sabe-se que os parâmetros de resistência usados como dados de entrada para o modelo são aqueles de referência: ângulo de atrito de 20° e coesão de 20 kPa. A Figura 30 apresenta os pontos de máxima resistência ao cisalhamento para cada tensão normal obtidas pela modelagem numérica e calculadas pelo modelo de ruptura de Mohr-Coulomb (Equação 1) além da envoltória de ruptura referente aos valores do resultado numérico.

Os resultados obtidos numericamente de máxima resistência ao cisalhamento são muito próximos aos esperados, as diferenças entre os parâmetros de resistência obtidos numericamente e os valores de entrada do modelo são pequenas (Tabela 12).

Figura 30: Retroanálise com o modelo de placa dentada (Mohr-Coulomb).

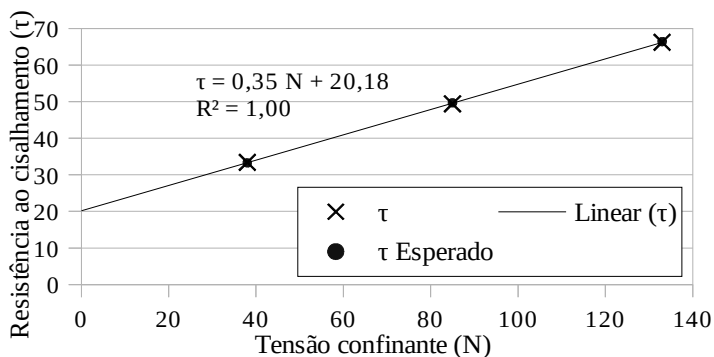
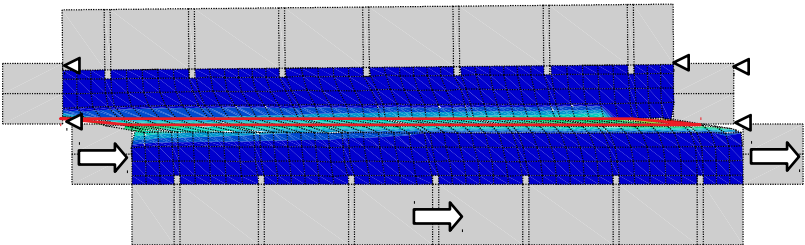


Tabela 12: Resultados da primeira retroanálise.

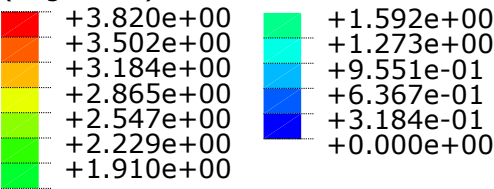
Valor	Resultado numérico	Resultado esperado	Divergência
$\tau_f (N = 38 \text{ kPa})$	33,4	33,3	0%
$\tau_f (N = 85 \text{ kPa})$	49,41	49,7	-1%
$\tau_f (N = 133 \text{ kPa})$	66,2	66,4	0%
$c \text{ (kPa)}$	20	20	0%
$\phi \text{ (}^\circ\text{)}$	19	20	-5%

Como análise complementar, buscou-se avaliar as médias tensões normais (σ_{22}) e cisalhantes (σ_{12}) na possível superfície de ruptura. Avaliando o perfil de deformação de diferentes corpos de prova, a linha de elementos logo acima do centro do corpo de prova foi escolhida para a análise (Figura 31).

Figura 31: Perfil de deformação plástica (PE) do corpo de prova.



PE, Max. In-Plane Principal
(Avg: 75%)



As tensões normais (σ_{22}) e de cisalhamento (σ_{12}) não são constantes ao longo da superfície escolhida, dessa forma foi calculada a média desses valores ao longo da superfície. O resultado dessa análise é

expresso na Figura 32 e Tabela 13. Fazendo-se essas medidas os resultados de máxima resistência do corpo de prova, ângulo de atrito e coesão também se mostraram próximos aos esperados. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) da envoltória de ruptura manteve-se próximo a 1,00.

Figura 32: Retroanálise do modelo por Mohr-Coulomb por $\overline{\sigma_{12}}$ e $\overline{\sigma_{22}}$

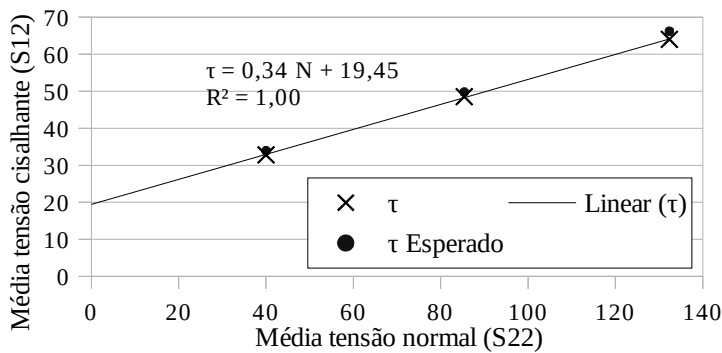
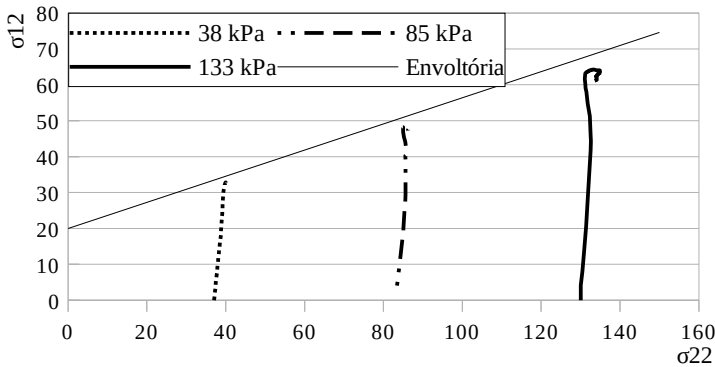


Tabela 13: Resultados da retroanálise do modelo de Mohr-Coulomb por $\overline{\sigma_{22}}$ e $\overline{\sigma_{12}}$ no centro da amostra.

Valor	Resultado numérico	Resultado esperado	Divergência
$\tau_f (N = 38 \text{ kPa})$	32,8	34,0	-4%
$\tau_f (N = 85 \text{ kPa})$	48,6	49,8	-2%
$\tau_f (N = 133 \text{ kPa})$	64,0	66,2	-3%
$c \text{ (kPa)}$	19,4	20	-3%
$\phi \text{ (}^\circ\text{)}$	18,6	20	-7%

Dos resultados obtidos a partir dos valores médios ainda é possível traçar um “caminho de tensões”, relacionando a média da tensão cisalhante no centro da amostra à média da tensão normal (Figura 33). Nota-se que o esforço normal atuante na amostra é praticamente constante, caracterizando, quase que completamente cisalhamento puro. Além disso, como já discutido, os valores de máxima resistência ao cisalhamento aproximam-se da envoltória de ruptura.

Figura 33: Caminhos de tensão por $\overline{\sigma_{12}}$ e $\overline{\sigma_{22}}$ (Mohr-Coulomb)



4.2.1.2 Modelo com placas lisas

Neste sub-ítem são apresentados e discutidos os resultados relativos às modelagens realizadas com as placas lisas (geometria representada na Figura 9). O material do corpo de prova modelado foi definido de acordo com o modelo elastoplástico com envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.

Os resultados das análises paramétricas realizadas para o modelo de placas lisas são apresentados nas Figuras 34 a 37.

A Figura 34 apresenta a análise para variação da coesão. As curvas representam a tensão normalizada pelo esforço normal (τ/N) em relação a movimentação relativa da caixa.

Para essas curvas, observa-se que a mobilização de resistência acontece de forma diferente para cada uma das três curvas, além disso, ao contrário do constatado para os modelos com placa dentada, não se observa claramente o início da plastificação. Nota-se também que a máxima resistência aumenta de acordo com a coesão, porém se forem comparados os resultados de τ/N com os valores esperados, existe uma maior diferença (Tabela 14).

Quanto maior o valor da coesão maior a divergência observada entre o resultado calculado e o resultado da simulação numérica. Além disso, os valores obtidos pela simulação foram, em todos os casos, menores que os calculados pela Equação 11.

Figura 34: Análise paramétrica de acordo com a coesão (lisa)

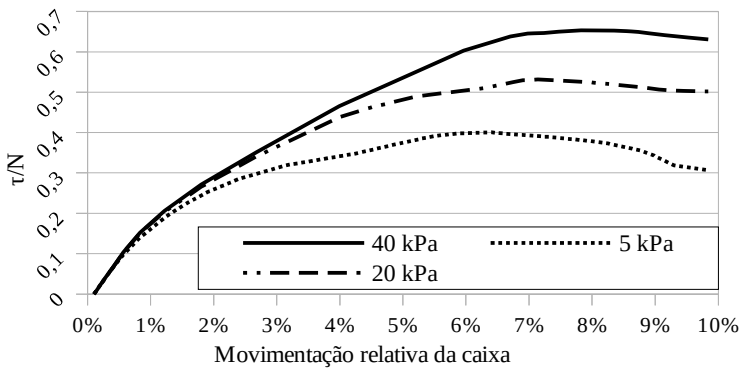


Tabela 14: valores de τ_f/N na análise paramétrica de c (lisa).

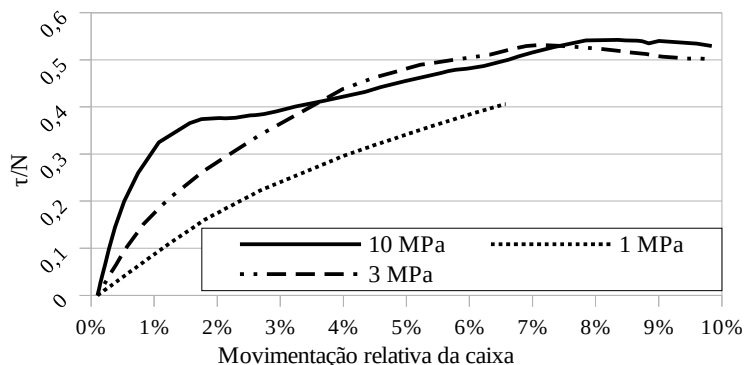
Curva	τ_f/N (simulação numérica)	τ_f/N (calculado)	Divergência
5 kPa	0,40	0,42	-5%
20 kPa	0,53	0,60	-12%
40 kPa	0,56	0,83	-33%

A análise paramétrica realizada para o modelo com placas lisas quanto ao módulo de elasticidade é expressa na Figura 35. Na ordenada do gráfico de análise é expresso o parâmetro de resistência normalizada τ/N . No início da movimentação da caixa observa-se que quanto maior o módulo de elasticidade, mais rapidamente acontece a mobilização de resistência.

Apesar das curvas geradas com a atribuição ao corpo de prova de E igual a 1 e 3 MPa não apresentarem mudanças bruscas na inclinação da curva, a curva obtida com 10 MPa (o maior valor) apresenta mudanças de inclinação mais abruptas.

Quanto a máxima resistência ao cisalhamento, as curvas formadas com o parâmetro igual a 10 e 3 MPa tendem a um mesmo valor. Essa análise não pode ser feita para a curva obtida com $E = 1$ MPa pois essa encontrou uma instabilidade numérica antes da movimentação desejada da caixa.

Figura 35: Análise paramétrica de acordo com ao módulo de elasticidade (lisa)



A Figura 36 apresenta a análise paramétrica quanto ao ângulo de atrito. É observada grande influência desse parâmetro na resistência ao cisalhamento. Mais uma vez, nos modelos gerados com as placas lisas, não são observadas mudanças bruscas de inclinação em nenhuma das três curvas.

De maneira geral, as curvas obtidas com valores associados de ângulo de atrito de 20° e 35°, apresentam comportamento semelhante. A curva obtida atribuindo-se 5° mostra uma mobilização de resistência inicial seguida de um patamar de estabilização.

Quanto a máxima resistência ao cisalhamento pode-se fazer uma análise em relação à equação de ruptura de Mohr-Coulomb. Os valores de comparação de τ_f/N obtidos via simulação numérica com os valores calculados são apresentados na Tabela 15. Nota-se que τ_f/N da simulação numérica obtida com $\phi = 35^\circ$ é semelhante ao valor calculado, porém a simulação mostrou que para valores menores de ângulo de atrito, os resultados obtidos de τ_f/N ficaram bem abaixo do calculado.

Figura 36: Análise paramétrica de acordo com ao ângulo de atrito (lisa)

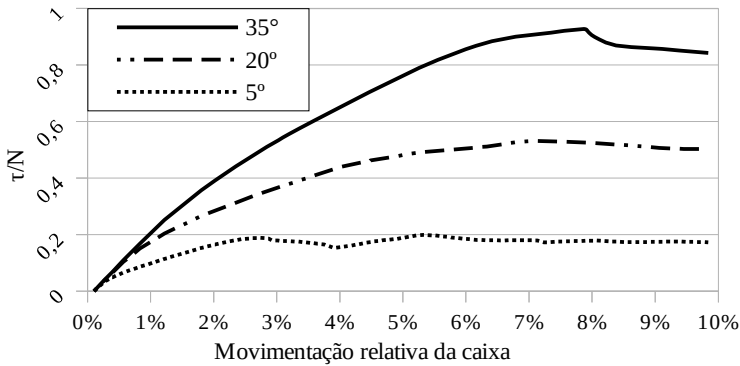
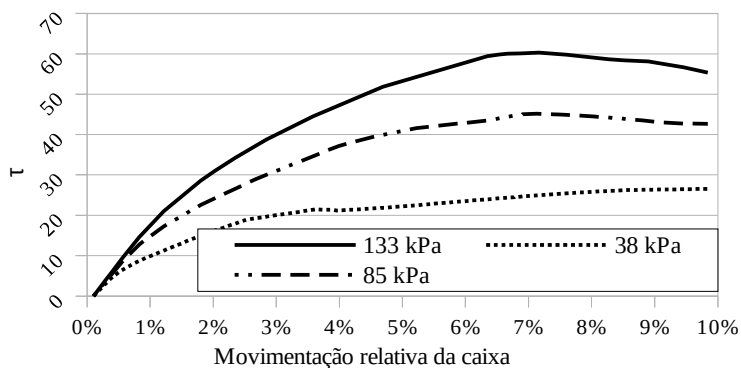


Tabela 15: valores de τ_f/N na análise paramétrica de ϕ (lisa).

Curva	τ_f/N (simulação numérica)	τ_f/N (calculado)	Divergência
5°	0,20	0,32	-38%
20°	0,53	0,58	-9%
35°	0,92	0,85	8%

A análise paramétrica quanto ao esforço normal aplicado a amostra (N) é apresentada na Figura 37. pode-se notar que as três curvas apresentam comportamento semelhante, se diferenciando apenas no ganho de resistência. Além disso, para os três casos o pico de resistência encontra-se em níveis próximos de movimentação relativa da caixa. Quanto maior a tensão confinante (N), maior a resposta de resistência ao cisalhamento ao aplicar a movimentação.

Figura 37: Análise paramétrica de acordo com ao esforço normal (lisa)



A análise paramétrica feita a diferentes tensões normais assemelha-se ao ensaio de Cisalhamento Direto, pois também possui três estágios realizados com diferentes tensões confinantes. Buscou-se realizar uma retroanálise idêntica à realizada no sub-ítem 4.2.1.1. Para o modelo em questão foram buscados os máximos valores de tensão cisalhante (τ_f) de cada estágio, para então encontrar a envoltória de Mohr-Coulomb, descrita pelos coeficientes c e ϕ (Figura 38). Na retroanálise, foram encontrados $c = 13,7$ kPa e $\phi = 19,5^\circ$. Comparando esses resultados com os dados de entrada (20 kPa e 20°) nota-se uma diferença considerável, principalmente em relação à parcela coesiva. Os três valores de resistência ao cisalhamento obtidos pela simulação mantiveram-se menores que os esperados, principalmente na simulação realizada com a menor tensão normal (38 kPa), que apresentou uma diferença de -20% (Tabela 16).

Figura 38: Retroanálise com o modelo de placa lisa (Mohr-Coulomb).

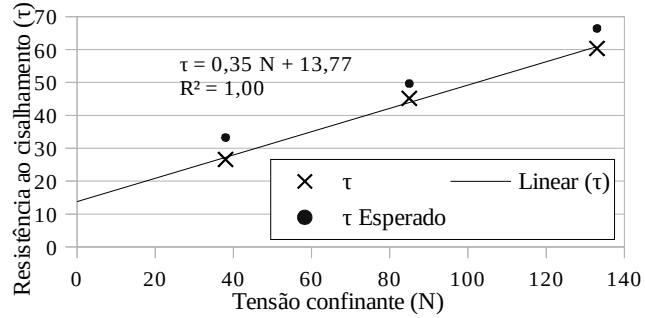
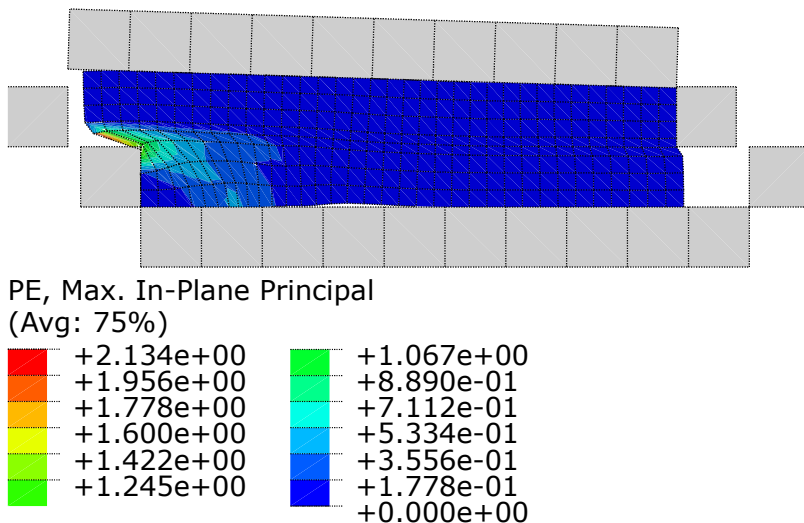


Tabela 16: valores de τ_f na análise paramétrica de N (placa lisa).

Valor	Resultado numérico	Resultado esperado	Divergência
τ_f ($N = 38$ kPa)	26,6	33,3	-20%
τ_f ($N = 85$ kPa)	45,2	49,6	-9%
τ_f ($N = 133$ kPa)	60,3	66,4	-9%
c (kPa)	13,8	20	-31%
ϕ (°)	19,5	20	-3%

Quanto à obtenção de dados para uma análise semelhante à aplicada na sub-seção 4.2.1.1, baseada na obtenção dos parâmetros τ_f e N da seção central da amostra, numa provável superfície de ruptura, essa análise não cabe ao modelo em questão pois a superfície de ruptura frequentemente não se forma no centro do corpo de prova, como no caso do modelo mostrado na Figura 39.

Figura 39: Perfil de deformação plástica típica do corpo de prova sem o uso dos dentes.



4.2.2 Análise paramétrica das simulações utilizando o modelo elastoplástico *Cam-clay*

Para a realização dessas análises foram usados parâmetros (λ , κ , M , p'_{c0} e e_0) de uma das amostras de solo caracterizadas por Godoi (2014) como os valores de referência. Para realizar a análise paramétrica os valores de referência de índice de compressão (λ), metade da pressão consolidação inicial (p'_{c0} para $a = p'_{c0} / 2a$) e esforço normal aplicado a corpo de prova (N) foram perturbados para valores maiores e menores de modo a identificar a influência de cada parâmetro no comportamento da amostra durante a fase de cisalhamento do ensaio de Cisalhamento Direto.

A amostra escolhida como referência foi a amostra 02, dessa forma os valores de referência e valores perturbados são listados na Tabela 17.

Tabela 17: valores para a análise paramétrica com modelo elastoplástico *Cam-clay*

Parâmetro	Valor menor	Valor de referência	Maior valor
λ	0,1	0,172	0,3
κ	-	0,0269	-
M	-	1,16	-
a	70 kPa	115 kPa	150 kPa
e_0	-	0,857	-
N	38 kPa	85 kPa	133 kPa

A exemplo do sub-ítem 4.2.1, cada análise paramétrica é composta por três curvas, uma para cada valor do parâmetro, relacionando a tensão cisalhante (resistente ao movimento) à movimentação relativa da caixa.

4.2.2.1 Modelo com placa dentada

As simulações apresentadas nesse ítem foram feitas a partir da simulação realizada com a geometria com placa dentada (Figura 10), idêntica à utilizada na avaliação inicial do modelo (sub-capítulo 4.1.2), portanto devem seguir padrões de comportamento semelhante.

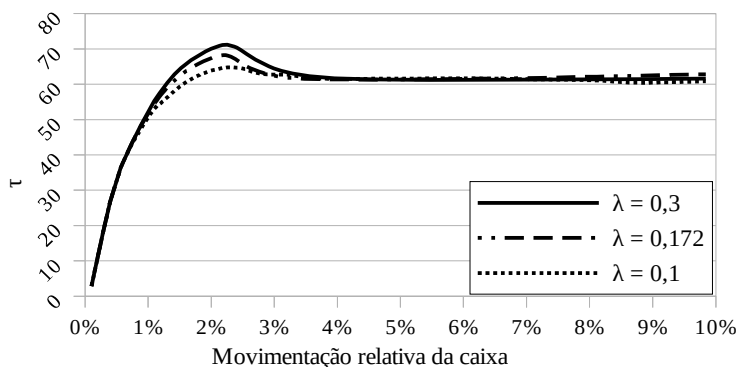
A Figura 40 apresenta a análise paramétrica realizada em relação ao índice de compressão do material (λ). De maneira geral esse parâmetro demonstrou pouca interferência no comportamento do corpo de prova.

Nota-se pouca interferência em relação a fase inicial de movimentação e em relação a resistência última. O parâmetro tem alguma interferência no pico de resistência: quanto maior o valor do parâmetro (mais rígido o material) maior o pico de resistência.

A pouca influência do índice de compressão em relação ao corpo de prova pode ser explicada pelo índice de pré adensamento, se feita uma análise simplificada, a tensão normal aplicada ao corpo de prova durante a fase de cisalhamento é de 85 kPa, e a tensão de consolidação inicial (duas vezes a) é 230 kPa, portanto $N < a$. Dessa forma os estados

de tensão encontram-se sempre dentro da envoltória elíptica, região onde o comportamento do material é majoritariamente definido pelo índice de recompressão (κ).

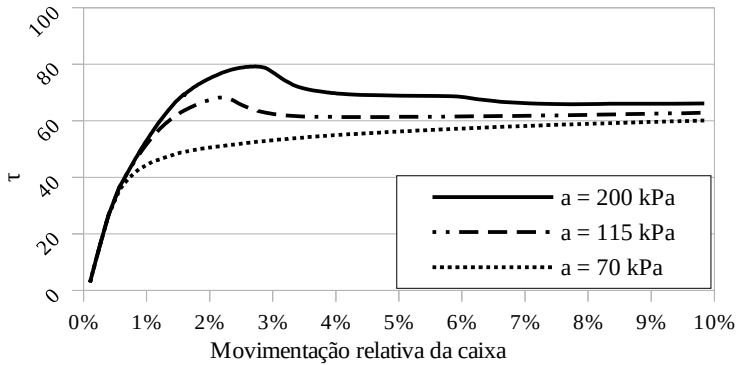
Figura 40: Análise paramétrica em relação ao índice de compressão (λ)



A análise paramétrica em relação a tensão de pré adensamento (duas vezes a) é apresentada na Figura 41. Observa-se que quando a é menor que a tensão normal aplicada ao modelo, o pico de resistência não ocorre, contudo, quanto maior a tensão de pré adensamento, maior o pico de resistência e consequentemente maior a máxima resistência ao cisalhamento. O parâmetro em questão não demonstra influência quanto a resistência última ao cisalhamento, as três curvas apresentadas tendem para um mesmo valor.

Esse parâmetro também não apresenta influência na rigidez inicial do modelo, as curvas de mobilização de resistência se diferenciam de acordo com o pico de resistência.

Figura 41: Análise paramétrica em relação à tensão de pré adensamento (duas vezes a)



A Figura 42 apresenta as curvas geradas realizando as simulações à diferentes esforços normais aplicados ao corpo de prova modelado (N). É possível verificar que quanto maior o valor de N , maiores as resistências mobilizadas. Além disso, mais rígido o material se apresenta.

Como constatado na análise paramétrica anterior (em relação à tensão de pré adensamento), quando o valor de N ultrapassa a , o pico de resistência não ocorre. Nesse caso, sendo $a = 115$ kPa, a curva que não apresenta pico de resistência é obtida com a aplicação de $N = 133$ kPa, enquanto as outras duas, com tensões normais menores, apresentam pico.

Para comparar os resultados de máxima resistência ao cisalhamento é possível realizar a análise em relação à equação da superfície de plastificação elíptica, apresentada a seguir:

$$f = \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{p}{a} - 1 \right)^2 + \left(\frac{t}{Ma} \right)^2 - 1, \text{ com } p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (12)$$

A equação 12 é a equação apresentada para o modelo *clay-plasticity* do software ABAQUS®. Para a modelagem em questão o modelo *Cam-clay* original foi adotado, logo, $t = q$ e $\beta = 1$. No estado de plastificação, $f = 0$ e supondo cisalhamento puro, $q = \sqrt{3} \cdot \tau$.

Com o intuito de fazer uma previsão da máxima resistência ao cisalhamento (τ), para o caso de cisalhamento puro, adotou-se $p = N$,

dessa forma pode-se encontrar τ na plastificação (ponto na superfície elíptica) em função de N .

A relação baseada na Equação 12 é válida para a resistência de pico quando $N \leq a$, para a resistência última e casos em que $N \geq a$ usa-se:

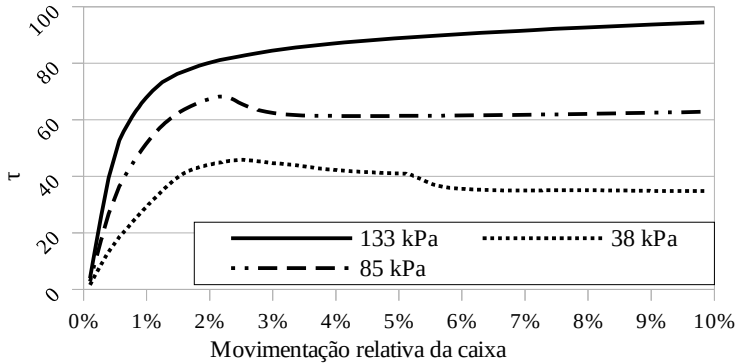
$$t = M \cdot p \tag{13}$$

A comparação entre os valores de máxima resistência ao cisalhamento alcançados na simulação e os valores de τ no estado de plastificação segundo as Equações 13 e 13 são apresentadas na Tabela 18. As divergências nos valores de máxima resistência ao cisalhamento em relação à resistência esperada podem ser justificadas pela plastificação dos elementos à diferentes movimentações da caixa. A resistência máxima de cada elemento, portanto, é mobilizada em momentos diferentes, resultando numa menor resistência de pico quando analisada a resistência do modelo como um todo, por meio da reação nas caixas.

Tabela 18: valores de τ_f na análise paramétrica de N (placa dentada).

Curva	τ_f (simulação numérica)	τ_f (calculado)	Divergência
38 kPa	45,8	57,2	-20%
85 kPa	68,2	74,4	-8%
133 kPa	94,4	98,1	-4%

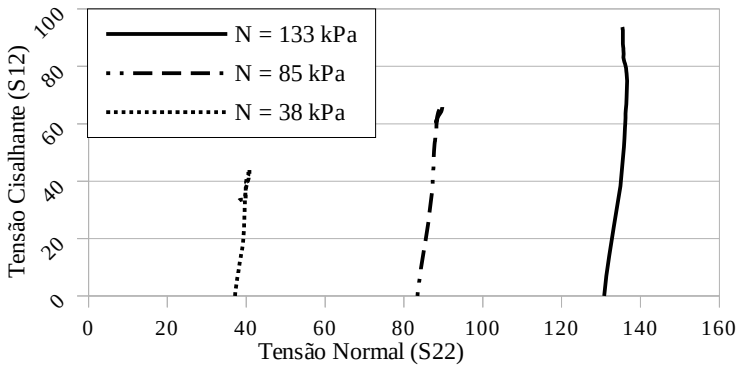
Figura 42: Análise paramétrica em relação à tensão normal aplicada ao modelo (N)



Para complementar a análise paramétrica em relação à N foram medidas as tensões σ_{22} e σ_{12} , correlatas respectivamente a N e τ . A Figura 43 traz esses parâmetros, representando o caminho médio de tensões para o centro da amostra. Nota-se que durante a fase de cisalhamento as curvas crescem em σ_{12} com pouca alteração em σ_{22} , demonstrando proximidade com o estado de cisalhamento puro.

Nota-se também que existe uma tendência de intersepto coesivo. Esse efeito é gerado pelo acréscimo do efeito de pico ao modelo elastoplástico *clay-plasticity* pelo software ABAQUS® quando $N < a$.

Figura 43: Caminhos de tensão por $\overline{\sigma_{12}}$ e $\overline{\sigma_{22}}$ (Clay-Plasticity)



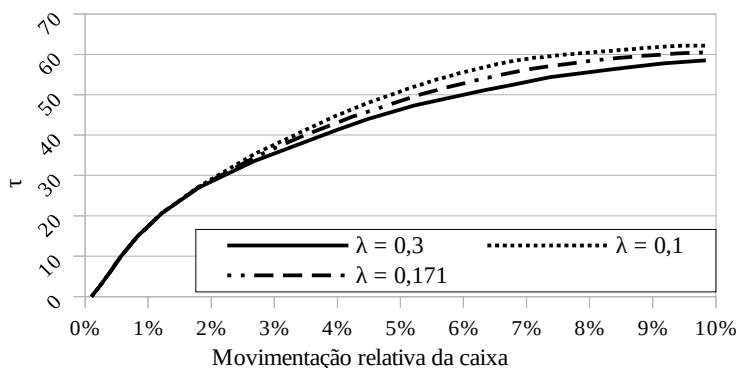
4.2.2.2 Modelo com placa lisa

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir das análises paramétricas realizadas com a geometria demonstrada na Figura 9 (placa lisa). Essas análises contemplam os parâmetros índice de compressão (λ), pressão de pré adensamento (p'_{co} para $p'_{co} / 2 = a$), e o esforço normal aplicado ao modelo (N).

A Figura 44 apresenta as curvas obtidas com diferentes valores de índice de compressão (λ). Apesar da equação da superfície crítica não prever mudança no valor de resistência, nota-se alguma influência da variável nas curvas, influenciando levemente, de forma a aumentar a resistência mobilizada quando o valor do parâmetro é menor.

Percebe-se também que o resultado numérico não apresenta um pico de resistência, como quando feita análise semelhante usando para a modelagem a geometria com placa dentada. Também pode ser observado que tensões são mais lentamente mobilizadas, mesmo movendo a caixa em 1 cm, não se percebe uma estabilização nos valores de resistência ao movimento.

Figura 44: Análise paramétrica em relação ao índice de compressão com placa lisa.

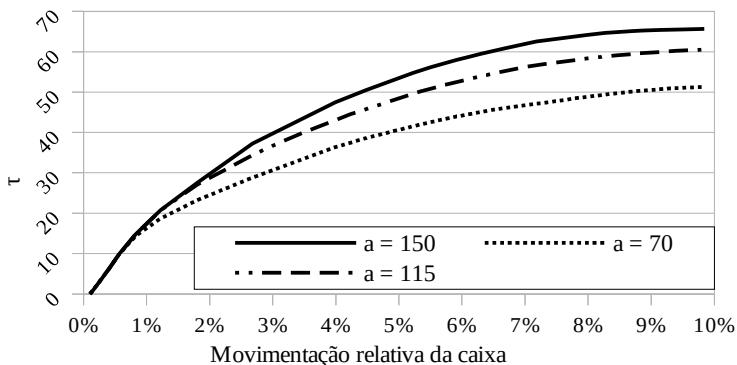


Na Figura 45 são apresentadas as curvas relativas à análise paramétrica em função do parâmetro a (metade da pressão de pré consolidação).

A variação desse parâmetro interfere na resistência do material, quanto maior a pressão de pré adensamento, maior a resistência mobilizada, porém, de acordo com o modelo elastoplástico essa relação só deve ser observadas quando $p < a$ (Equações 12 e 13). Em comparação com a mesma análise realizada com a placa dentada, o pico de resistência esperado nas curvas obtidas com $a = 150$ kPa e $a = 115$ kPa (valores maiores que $N = 85$ kPa) não são perceptíveis. As três curvas têm formato muito semelhante.

À menores movimentações da caixa as três curvas têm uma mesma inclinação, porém, no decorrer da fase de cisalhamento as curvas obtidas à menores pressões de pré consolidação mostram-se mais compressíveis (diferenciando-se).

Figura 45: Análise paramétrica em relação ao parâmetro a (metade da pressão de pré adensamento)



Quanto à análise paramétrica referente a tensão normal (N), a Figura 46 apresenta as curvas de resistência em função da movimentação relativa da caixa para três valores de N : 38, 85 e 133 kPa. Como esperado, nota-se a influência da tensão normal aplicada ao modelo em relação à resistência ao cisalhamento: quanto maior o esforço normal, maior a resistência da amostra. Contudo essas resistências mobilizadas estão significativamente abaixo das esperadas para um corpo de prova nessas condições. As comparações entre os valores de resistência ao cisalhamento encontrados na análise paramétrica e os valores calculados pelas Equações 12 ou 13, são apresentadas na Tabela 19.

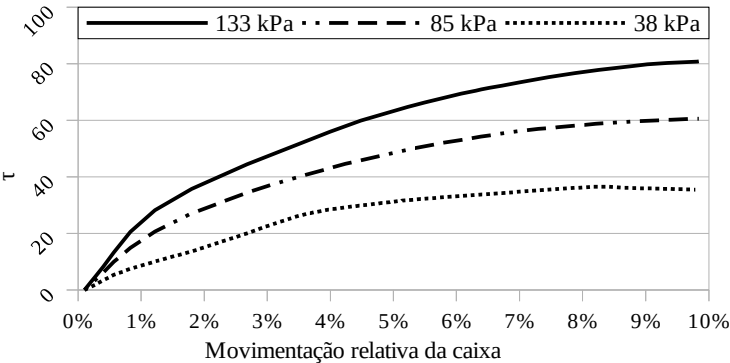
Tabela 19: valores de τ_f na análise paramétrica de N (placa lisa).

Curva	T_f (simulação numérica)	τ_f (calculado)	Divergência
38 kPa	36,5	57,2	-36%
85 kPa	60,5	74,4	-19%
133 kPa	80,8	98,1	-18%

Como esperado, o parâmetro N , tensão normal, exerce influência sobre a rigidez do material, que aumenta em tensões normais mais altas.

Não é observado pico de resistência em nenhuma das curvas, contudo quando $N < a$ se espera observar um pico de resistência (HELWANY, 2007), como também observado nas mesmas condições de modelagem porém no modelo com placa dentada (Figura 42).

Figura 46: Análise paramétrica em relação à pressão normal aplicada ao corpo de prova (N)

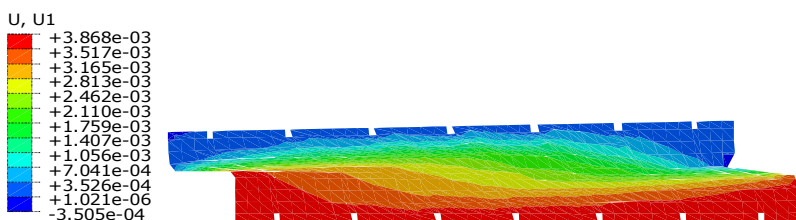


4.3 Análises complementares em relação ao uso da placa dentada

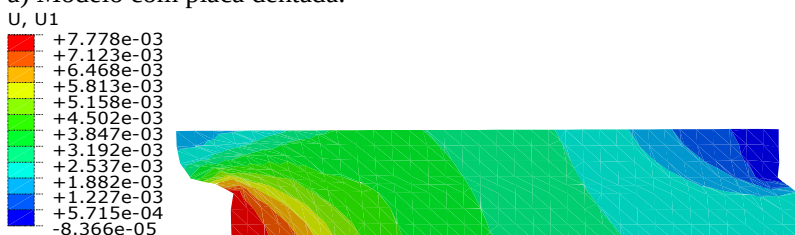
Com o intuito de discutir a influência da correta utilização da placa dentada durante o ensaio do cisalhamento direto, algumas análises complementares, baseadas nas análises paramétricas apresentadas no sub-item anterior (4.2), foram realizadas.

Na Figura 47 estão representada os deslocamentos em x ($U1$ no ABAQUS®) no pico de resistência para as simulações considerando o modelo elastoplastico de Mohr-Coulomb, considerando a placa dentada (Figura 47 a) e a placa lisa (Figura 47 b). Os resultados apresentados na Figura 47 referem-se ao material de referência descrito no sub-item 4.2.1. As cores representam intervalos de movimentação, dessa forma percebe-se que o material ao longo das placas dentadas (Figura 47 a) apresentam níveis de deslocamento semelhantes, o que favorece a distribuição uniforme de esforços. Por outro lado, a placa lisa (Figura 47 b) não foi efetiva em deslocar o solo.

Figura 47: Estados típicos de movimentação



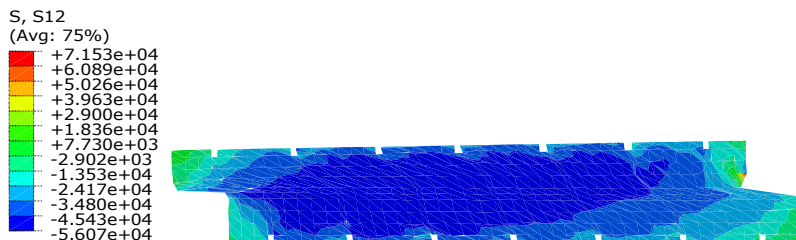
a) Modelo com placa dentada.



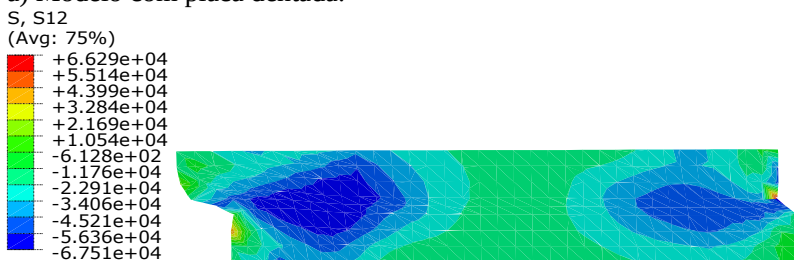
b) Modelo com placa lisa.

A Figura 48 apresenta as tensões cisalhantes ($S12$ no ABAQUS®) para os casos avaliados na Figura 47. É possível observar que na situação *a* (Figura 48, placa dentada) a distribuição de tensões é mais homogênea no interior da amostra, enquanto na situação *b* (Figura 48, placa lisa) existem áreas próximas às laterais com valores de tensão mais elevados em relação ao centro da amostra, gerados pela má distribuição dos deslocamentos.

Figura 48: Estados típicos de tensão cisalhante



a) Modelo com placa dentada.



b) Modelo com placa lisa.

Como complemento a essa análise, usando como base os modelos de referência para as análises paramétricas, foram pesquisadas as transferências de esforços às placas e às caixas laterais. Nas Figuras 49 e 50 são apresentados os resultados relacionados aos modelos com *clay-plasticity* e nas Figuras 51 e 52 são apresentados os resultados em relação à melagem com Mohr-Coulomb. A interpretação dos resultados é semelhante.

Nota-se que quando usada a placa dentada (Figuras 49 e 51) existe uma razão constante entre as tensões mobilizadas pelas caixas, na lateral, e as tensões mobilizadas pela placa, indicando boa distribuição de tensões entre os elementos. Além disso, as placas são os elementos responsáveis por mobilizar a maior parte das tensões no corpo de prova durante a fase de cisalhamento. Por outro lado, quando se analisam as tensões mobilizadas pelos mesmos elementos no modelo com placa lisa, nota-se uma tendência inicial semelhante, porém a tensão mobilizada pela placa lisa chega a um limite, ligado ao ângulo de atrito equivalente da superfície de contato modelada. Com o aumento da movimentação da caixa, as laterais começam a atuar mais significativamente na sollicitação de prova, sendo nesse caso as laterais da caixa os elementos responsáveis por mobilizar a maior parte das tensões (Figuras 50 e 52).

Figura 49: Reações dos apoios com placa dentada (*clay-plasticity*)

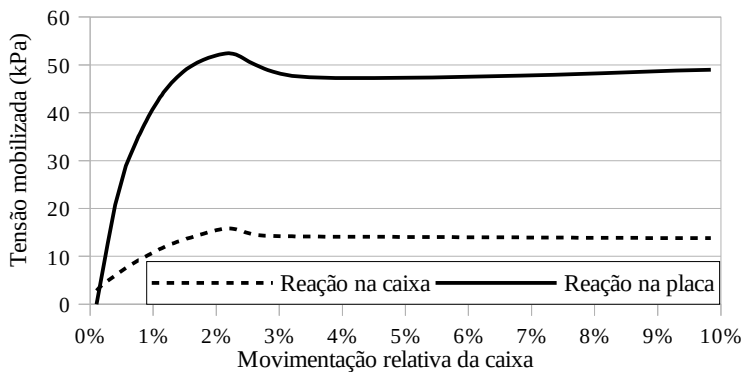


Figura 50: Reações dos apoios com placa lisa (*clay-plasticity*)

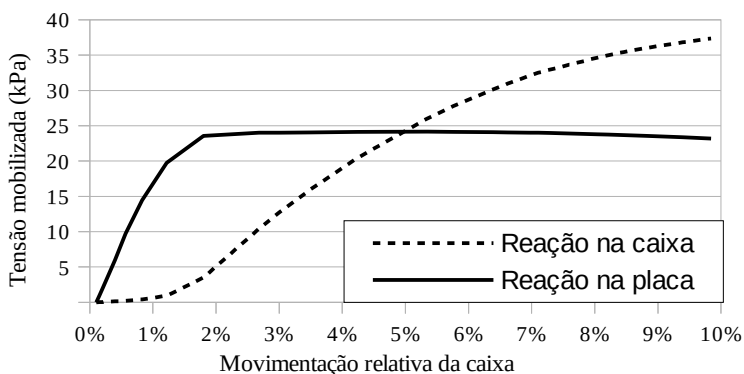


Figura 51: Reações dos apoios com placa dentada (Mohr-Coulomb)

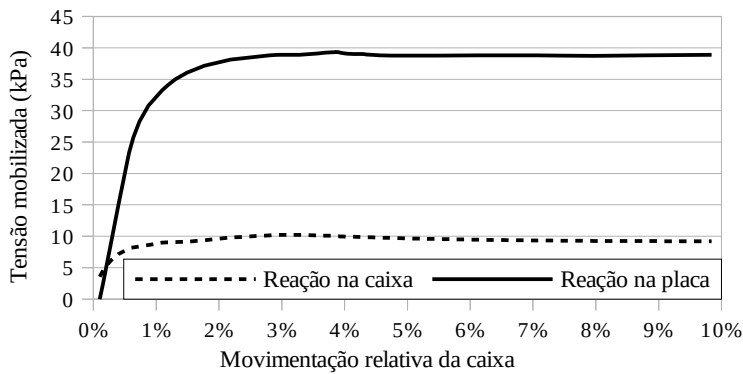
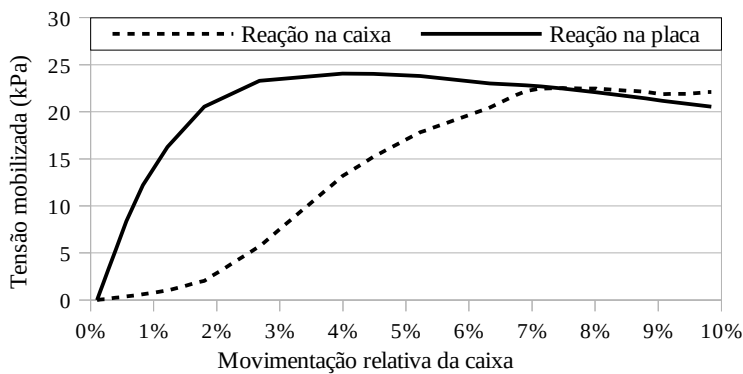


Figura 52: Reações dos apoios com placa lisa (Mohr-Coulomb)



É possível também realizar a comparação de resultados das simulações do ensaio de cisalhamento direto usando as análises paramétricas relativas ao esforço normal, traçando envoltórias de ruptura para cada um dos casos e identificando as diferenças de resultado. As Tabelas 20 e 21 e Figuras 53 e 54 apresentam os resultados das simulações do ensaio de cisalhamento direto com placas lisas e dentadas para os modelos obtidos pelos comportamentos elastoplástico com envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb e com *clay-plasticity*.

Figura 53: Ensaiois simulados (modelo com envoltória de Mohr-Coulomb).

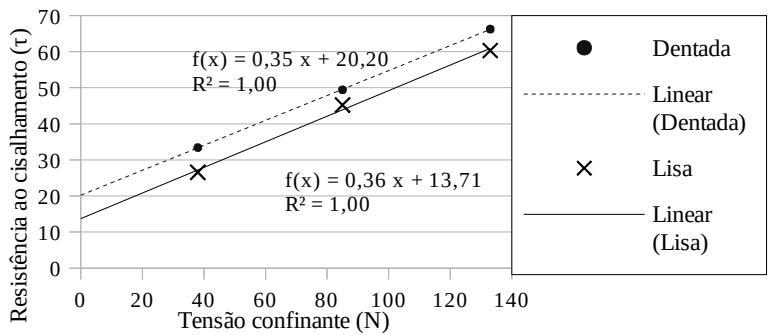


Tabela 20: Ensaiois simulados (modelo com envoltória de Mohr-Coulomb).

Valor	Placa dentada	Placa lisa	Divergência
τ_f (N = 38 kPa)	33,4	26,6	-20%
τ_f (N = 85 kPa)	49,4	45,2	-9%
τ_f (N = 133 kPa)	66,2	60,3	-9%
c (kPa)	20,2	13,7	-32%
ϕ (°)	19,5	19,1	-2%

Figura 54: Ensaiois simulados (*clay-plasticity*).

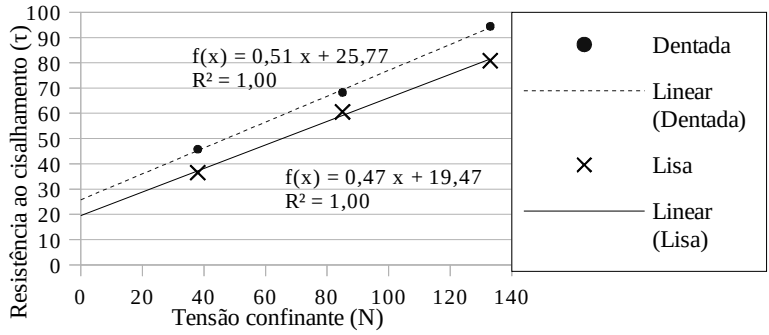


Tabela 21: Ensaios simulados (*clay-plasticity*).

Valor	Placa dentada	Placa lisa	Divergência
$\tau_f (N = 38 \text{ kPa})$	45,8	36,5	-20%
$\tau_f (N = 85 \text{ kPa})$	68,2	60,5	-11%
$\tau_f (N = 133 \text{ kPa})$	94,4	80,3	-15%
$c \text{ (kPa)}$	25,8	19,5	-24%
$\phi \text{ (}^\circ\text{)}$	27,1	25,0	-8%

Conforme observado nas Figuras 53 e 54 e Tabelas 20 e 21 as maiores diferenças entre as envoltórias de ruptura obtidas pelas simulações numéricas com placas lisas e com placas dentadas encontram-se no intercepto coesivo. Essa diferença pode ser compreendida quando se analisam as superfícies de ruptura típicas de modelos cisalhados com os dois tipos de placa. Nos modelos com placa dentada, a superfície de ruptura encontra-se de maneira geral no centro na amostra (Figura 55 a), porém nos modelos com as placas lisas a superfície de ruptura forma uma cunha e percorre a interface placa-solo (Figura 55 - b), fenômeno também descrito por Silva (2001), quando os dentes da placa não cravam no corpo de prova.

A Figura 55 foi construída com base na interpretação de resultados típicos (ver Figuras 47 e 48 e Figuras anexas 1 a 8).

Segundo Tschebotarioff (1951) quando a superfície de ruptura acontece no solo, consideram-se duas componentes de resistência: um intercepto coesivo somado a um fator relacionado ao esforço normal e ao ângulo de atrito (Equação 1). Por outro lado, segundo Bodó e Jones (2013) quando há movimento relativo entre o solo e uma superfície outra, não se considera a parcela coesiva, apenas uma parcela que está relacionada ao esforço normal e ao ângulo de atrito equivalente (δ) (Equação 14). Dessa forma, no ensaio de cisalhamento direto, quando as placas dentadas atuam de forma correta e a superfície de ruptura acontece no centro da amostra (Figura 55 a) a resistência ao cisalhamento encontrada no ensaio, em geral, segue a tendência da envoltória crítica de Mohr-Coulomb. Por outro lado, quando a superfície de ruptura forma uma cunha e passa pela interface entre placa dentada e solo (Figura 55 b), a parcela coesiva é prejudicada.

$$\tau_f = N \cdot \delta \quad (14)$$

Figura 55: Superfícies de ruptura, ensaio de Cisalhamento Direto

Corte longitudinal



a) Superfície de ruptura no centro da amostra



b) Superfície de ruptura em cunha

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo a identificação da influência da não utilização ou da não cravação da placa dentada ao corpo de prova durante a fase de cisalhamento do ensaio de Cisalhamento Direto. Para que este objetivo fosse atingido dois modelos de geometria bidimensional foram adotados para um conjunto de simulações no *software* de elementos finitos ABAQUS®.

Uma análise preliminar dos modelos geométricos (amostra com placa dentada e amostra com placa lisa) foi feita com base em um conjunto de dados da dissertação de Godoi (2014), na qual diversos ensaios foram executados em um conjunto de amostras de solos residuais de gnaiss. Esta referência foi adotada pois apresentava um conjunto de resultados suficiente tanto para a retirada dos parâmetros necessários à modelagem (módulos de deformação e resistência) quanto para a avaliação dos modelos.

Na análise preliminar dos modelos, a geometria bidimensional desenvolvida para esse trabalho, junto aos modelos elastoplásticos definidos para o solo se mostraram eficientes em representar as curvas típicas de tensão e deformação apresentadas nos ensaios de cisalhamento direto. Contudo, nessas análises, as curvas provenientes dos modelos com comportamento elastoplástico com envoltória de Mohr-Coulomb apresentaram uma rápida transição do comportamento elástico para a plastificação, não verificada nas curvas de ensaios de laboratório. Quanto às curvas provenientes dos modelos com o comportamento elastoplástico *clay-plasticity*, elas apresentaram um pico de resistência (típico de solos pré adensados) que não foi verificado nas curvas dos ensaios de laboratório.

A rigidez do material do corpo de prova, quando usado o modelo elastoplástico com envoltória de Mohr-Coulomb é definida pelo módulo de elasticidade E , esse parâmetro não demonstrou ter influência na máxima resistência ao cisalhamento porém é de difícil definição, pois varia com a tensão confinante. A rigidez do modelo *clay-plasticity* (definida pelos parâmetros κ e λ), por sua vez, tem relação com as tensões atuantes no solo, portanto não existe a mesma dúvida na definição desses parâmetros.

As análises paramétricas realizadas por meio do modelo elastoplástico com envoltória de Mohr-Coulomb demonstraram que os

parâmetros de entrada de ângulo de atrito e coesão tem influência próxima a esperada em relação à máxima resistência ao cisalhamento, porém quando usada a placa lisa o parâmetro do ângulo de atrito mostrou ter maior influência, comparado à coesão.

No modelo *clay-plasticity*, quando o material modelado apresenta índice de pré adensamento maior que dois, as curvas de tensão por movimentação da caixa apresentam um pico de resistência, diferenciando-se dessa forma do *Cam-clay* modificado. Essa adaptação do modelo elastoplástico pode gerar, quando se faz a simulação do ensaio de cisalhamento direto, um intercepto coesivo, como verificado nesse trabalho. Além disso, caso o material de estudo não apresente um pico de resistência a calibração do modelo pode ser realizada pelo ajuste do parâmetro a .

Quanto ao ensaio de cisalhamento direto, a retroanálise realizada no modelo de placa dentada e comportamento elastoplástico com envoltória de Mohr-Coulomb demonstrou grande capacidade de identificar as máximas resistências ao cisalhamento esperadas, bem como descrever com bastante precisão a envoltória de ruptura. Em relação ao modelo concebido com placa dentada e comportamento *clay-plasticity*, os resultados de máxima resistência ao cisalhamento se distanciaram dos valores esperados apenas nos modelos em que $N < a$, ou seja, quando a envoltória de ruptura é descrita pela superfície elíptica.

Em relação aos modelos com placa lisa (representando o não uso, ou não cravação da placa dentada), durante a fase do cisalhamento da modelagem, a superfície de ruptura se formou em cunha, percorrendo também a lateral do corpo de prova na maioria dos casos de simulação. Além disso, nestas avaliações, os valores de resistência foram, em geral, menores que os encontrados para as mesmas condições, obtidos do modelo com placa dentada. Foi verificado também, por meio das modelagens, que quando usada a placa lisa, a envoltória de ruptura proveniente do ensaio de cisalhamento direto tem seus parâmetros de resistência ϕ e principalmente c distorcidos.

Por fim, cabe destacar que as simulações mostraram-se pertinentes para o entendimento do mecanismo de ruptura associado a presença ou não da placa dentada. Através dos resultados das simulações pode-se perceber que a não cravação da placa pode interferir nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto, principalmente em relação à parcela coesiva. Pode-se concluir também que para a execução do ensaio de cisalhamento direto é necessário, além do uso da placa

dentada, ao final de cada estágio verificar se ocorreu a cravação dos dentes ao corpo de prova e se a superfície de ruptura se desenvolveu na parte central da amostra. Se essas circunstâncias não forem cumpridas é possível que os resultados do ensaio sejam comprometidos.

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

Durante a realização do trabalho muitas hipóteses foram assumidas e muitas questões não foram abordadas, dessa forma podem ser deixadas algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Realizar um trabalho visando avaliar o uso da placa dentada por meio do desenvolvimento de um modelo tridimensional em elementos finitos ou outro método numérico.
- Questões relacionadas à cravabilidade da placa dentada podem ser verificadas através de ensaios complementares.
- Por meio de um modelo semelhante ao desenvolvido no presente trabalho, podem ser verificadas questões relacionadas à velocidade da movimentação da caixa durante a fase de cisalhamento do ensaio de cisalhamento direto, ou seja, analisar as condições de fluxo durante o ensaio.

6 BIBLIOGRAFIA

- ABAQUS. **Abaqus Analysis User's Guide**. Rohde Island, USA: Simulia Corp, 2014.
- BAGHERZADEH-KHALKHALI, A.; MIRGHASEMI, A. A. Numerical and experimental direct shear tests for coarse-grained soils. **Particuology**, v. 7, n. 1, p. 83–91, 2009.
- BODÓ, B.; JONES, C. **Introdução a mecânica dos solos**. 1ª ed. Chichester: Editora GEN, 2013.
- CARTER, J. P.; DESAI, C. S.; POTTS, D. M.; SCHWEIGER, H. F.; SLOAN, S. W. Computing and Computer Modelling in Geotechnical Engineering. **GeoEng2000**, , n. February 2016, p. 96, 2000.
- CUI, L.; O'SULLIVAN, C. Exploring the macro- and micro-scale response of an idealised granular material in the direct shear apparatus. **Géotechnique**, v. 56, n. 7, p. 455–468, 2006.
- DADALTO, M. M.; DAKMONECH, N. Ângulo De Atrito Equivalente Do Solo E Elementos De Fundação Em Concreto, Aço E Madeira. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia - CONTECC 2015**, v. 1, p. 4, 2015.
- DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7ª ed. São Paulo: CENGAGE Learning, 2014.
- DOUNIAS, G. T. (ASCE.; POTTS, D. M. Numerical Analysis of Drained Direct and Simple Shear Tests. **Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 119, n. 12, p. 4–6, 1993.
- DRESCHER, A. Discussion of “Numerical Analysis of Drained Direct and Simple Shear Tests” by Andrew Drescher. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 121, n. 2, p. 223–225, 1995.
- FARO, V. P. **Carregamento lateral em fundações profundas associadas a solos tratados: concepção, provas de carga e diretrizes**, 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- GODOI, C. S. **Caracterização Geomecânica De Um Solo Residual De Gnaisse – Santo Amaro Da Imperatriz, Santa Catarina**, 2014. Universidade Federal de Santa Catarina.
- HEAD, K. H.; EPPS, R. J. **Manual of Soil Laboratory Testing: Vol II**. Boca Raton, EUA: Whittles Publishing, 2011.
- HELWANY, S. **Applied soil mechanics with ABAQUS applications**. First ed. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

- LAMBE, T. W.; WITHMAN, V. R. **Soil Mechanics**. 1º ed. Chichester, New york, 1969.
- MASSAD, F. **Mecânica dos solos experimental**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- MOAYED, R. Z.; TAMASSOKI, S.; IZADI, E. Numerical Modeling of Direct Shear Tests on Sandy. **International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering**, v. 6, n. 1, p. 943–947, 2012.
- OLSON, R.; LAI, J. Direct Shear Testing. **Advanced Geotechnical Laboratory**, p. 1–14, 2004.
- PINTO, C. DE S. **Curso básico de macânica dos solos**. 3ª edição ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- POTTS, D. M.; DOUNIAS, G. T.; VAUGHAN, P. R. Finite element analysis of the direct shear box test. **Géotechnique**, v. 37, n. 1, p. 11–23, 1987.
- SALAZAR, A.; SÁEZ, E.; PARDO, G. Modeling the direct shear test of a coarse sand using the 3D Discrete Element Method with a rolling friction model. **Computers and Geotechnics**, v. 67, p. 83–93, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.02.017>>.
- SILVA, R. S. **Ensaio de Cisalhamento Direto: Quando a Superfície de Ruptura não Ocorre em um Plano Horizontal**, 2001. Universidade Federal de Santa Catarina.
- TEIXEIRA, A. H.; DE GODOY, N. S. Análise, projeto e execução de fundações reais. **Fundações: Teoria e prática**. 2ª ed., p.42, 1998. São Paulo: Pini.
- TEIXEIRA, C. F. **Análise numérica de ensaios em solo reforçado com geogrelha**, 2006. PUC.
- THORNTON, C.; ZHANG, L. Numerical Simulations of the Direct Shear Test. **Chemical Engineering & Technology**, v. 26, n. 2, p. 153–156, 2003. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/ceat.200390022>>.
- TSCHEBOTARIOFF, G. P. **Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures**. McGraw-Hill, 1951.
- WOOD, D. M. **Soil behaviour and critical state soil mechanics**. Cambridge university press, 1990.
- WU, T. H. **soil mechanics**. Boston, USA: Allyn and Bacon, 1967.

Anexos

Nas figuras anexas 1 a 8 são apresentados os resultantes gráficos de deformação e deslocamento horizontal ao final da movimentação, e tensão cisalhante no pico de resistência. Essas figuras anexas são complementares às Figuras 47 e 48, no texto.

Os modelos de referência de comportamento elastoplástico com envoltória de Mohr-Coulomb (Figuras anexas 1 e 2) possuem como dados de entrada: $\phi = 20^\circ$, $c = 20$ kPa, $E = 3$ MPa, e $N = 85$ kPa.

Da mesma forma, os modelos de referência com comportamento *clay-plasticity* (Figuras anexas 3 a 8) possuem como dados de entrada: $\lambda = 0,172$, $\kappa = 0,0269$, $M = 1,16$, $a = 115$ kPa, $e_0 = 0,857$ e $N = 85$ kPa.

Figura anexa 1: Deformações (E) para modelo de referência com Mohr-Coulomb e placa dentada.

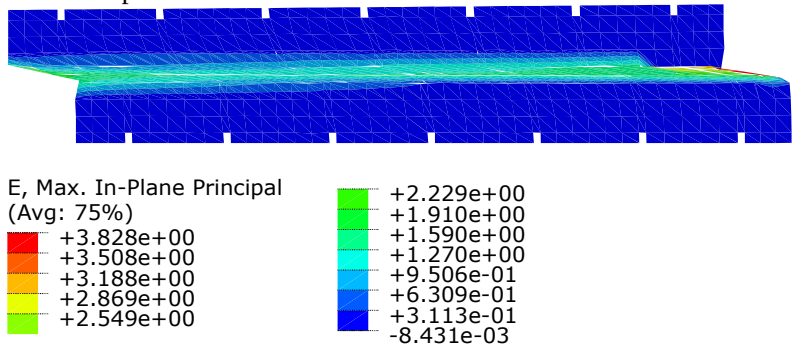


Figura anexa 2: Deformações (E) para modelo de referência com Mohr-Coulomb e placa lisa.

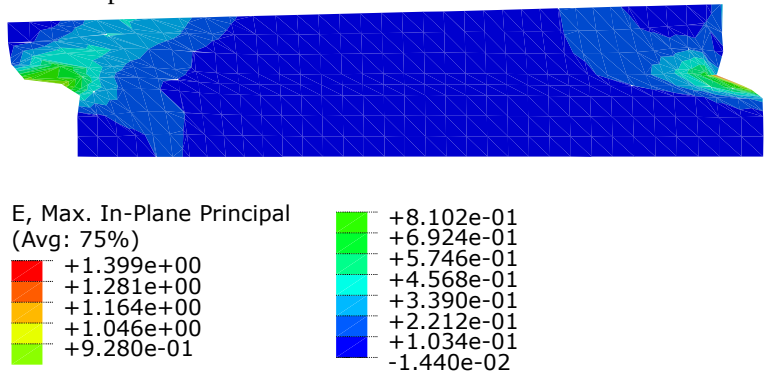


Figura anexa 3: Deslocamento horizontal (U1) para modelo de referência com *clay-plasticity* e placa dentada.

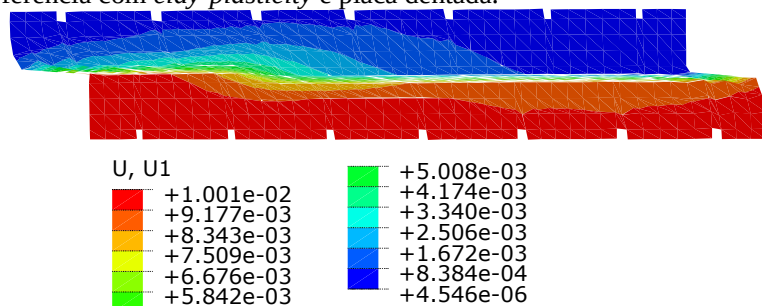


Figura anexa 4: Deslocamento horizontal (U1) para modelo de referência com *clay-plasticity* e placa lisa.

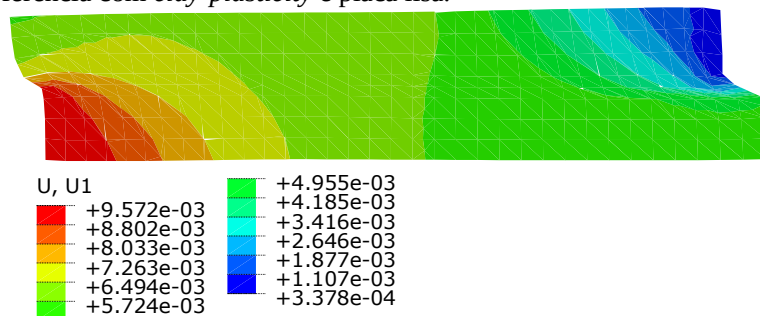


Figura anexa 5: Deformações (E) para modelo de referência com *clay-plasticity* e placa dentada.

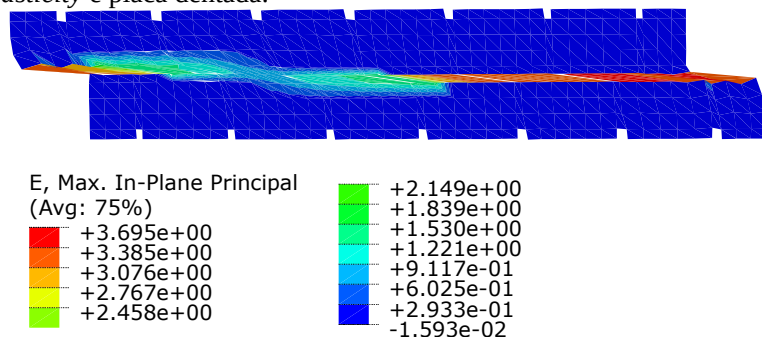


Figura anexa 6: Deformações (E) para modelo de referência com *clay-plasticity* e placa lisa.

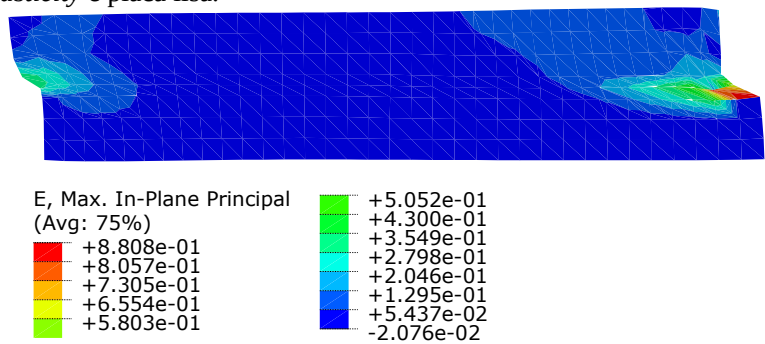


Figura anexa 7: Tensão cisalhante (S12) para modelo de referência com *clay-plasticity* e placa dentada.

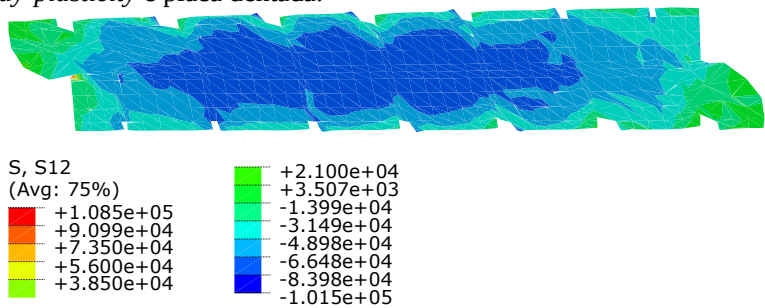


Figura anexa 8: Tensão cisalhante (S12) para modelo de referência com *clay-plasticity* e placa lisa.

